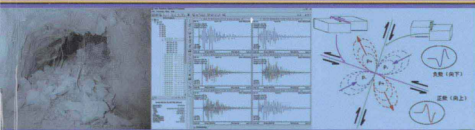


深井开采岩爆灾害 微震监测预警及控制技术

王春来 吴爱祥 刘晓辉 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



ISBN 978-7-5024-6259-8



9 787502 462598 >

定价29.00元

销售分类建议：矿业工程

本书得到以下基金资助:

国家“十二五”科技支撑计划(No. 2012BAB08B02)

国家“十一五”科技支撑计划(No. 2006BAB02A01)

教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(No. 20120023120008)

中央高校基本科研业务费专项基金(No. 2011QZ01)

2012 年北京市共建项目专业建设项目——采矿工程

深井开采岩爆灾害 微震监测预警及控制技术

王春来 吴爱祥 刘晓辉 著

北 京

冶金工业出版社

2013

内 容 提 要

本书结合工程实例,全面分析和论述了深井开采硬岩岩爆的前兆信息特征、影响因素、破坏特征、监测预警方法和工程控制技术。全书共7章,内容包括:深井岩爆灾害研究现状、深井开采岩爆灾害孕育机理、基于模糊物元理论的岩爆倾向性分析、深井开采岩爆灾害震源机制、深井开采岩爆灾害微震监测预测预警研究、基于灰色-突变理论的岩爆预测模型和深井开采岩爆灾害工程控制研究。

本书可供矿业工程、工程力学、岩土工程、交通工程、水利建设及地质工程等专业的师生阅读,也可供相关生产企业和科研单位的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

深井开采岩爆灾害微震监测预警及控制技术/王春来,
吴爱祥,刘晓辉著. —北京:冶金工业出版社, 2013. 5

ISBN 978-7-5024-6259-8

I. ①深… II. ①王… ②吴… ③刘… III. ①深井—
岩爆—小地震—地震监测 ②深井—岩爆—小地震—地震
控制 IV. ①TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 077178 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 张耀辉 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 禹 蕊 责任印制 张棋鑫

ISBN 978-7-5024-6259-8

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2013 年 5 月第 1 版, 2013 年 5 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 8.125 印张; 230 千字; 247 页

29.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

随着我国矿产资源开发力度加大，浅部资源日趋枯竭，复杂难采的深部资源成为开采的主要对象。不利的采矿条件不仅提高了采矿成本、降低了生产效率，而且大大增加了岩爆灾害发生的可能性，使得我国矿山的安全形势更加严峻。因此，开展矿山深部开采岩爆灾害预警与控制技术的研究便显得尤为重要。到目前为止，世界各国采矿界和岩土工程界的学者在岩爆灾害形成机理、预警及防治等方面已进行了大量的研究，但对岩爆灾害形成机理的认识以及预警模型判据的研究等还只停留在假说和经验阶段，利用岩爆灾害预测理论指导工程实践还相距甚远，而能够满足工程需要的预测与防治技术又多偏重于已发生过的灾情分析，不具预知性和普适性。因此，直接套用现有的理论成果来解决深井开采岩爆灾害问题是不适宜的。

近年来，作者结合国家“十一五”科技支撑计划

(No. 2006BAB02A01)、国家“十二五”科技支撑计划(No. 2012BAB08B02)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(No. 20120023120008)、中央高校基本科研业务费专项基金(No. 2011QZ01),以云南驰宏锌锗股份有限公司会泽铅锌矿为工程实例,对深井高应力条件下安全高效回采技术开展了系统的研究工作,本书就是作者在这些方面所取得的主要研究成果的初步总结。作者希望书中介绍的理论和方法,能对从事相关生产和研究工作的同行们有所裨益。由于深井开采岩爆灾害诱发机理、预警及控制方法研究涉及多学科理论和方法,因而仍有许多理论和实际问题有待于业内学者深入探讨和研究。

本书的完成和出版,得到了国家科技部科技支撑计划、国家教育部博士点基金和中央高校基本科研业务费专项基金的支持和帮助;撰写过程中得到了长沙矿山研究院徐必根高工(教授级)、唐绍辉高工(教授级)、刘小林高工(教授级)、谢长江高工(教授级)、唐海燕工程师、黄英华工程师、潘懿工程师、廖文景工程师和文兴工程师,以及云南驰宏锌锗股份有限公司会泽铅

锌矿陈进总经理（教授级高工）、吉学文高工、曾普海高工、何世林高工、李祥高工、严庆文高工、黄学贵工程师、吴顺江工程师和侯小兵工程师等多位领导和朋友的帮助；在此一并表示感谢。

限于作者水平，书中不当之处，恳请广大读者不吝赐教。

作 者

2013年3月于北京

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
中国冶金百科全书·采矿卷	本书编委会 编	180.00
现代金属矿床开采科学技术	古德生 等著	260.00
我国金属矿山安全与环境科技发展前瞻研究	古德生 等著	45.00
爆破手册	汪旭光 主编	180.00
采矿工程师手册(上、下册)	于润沧 主编	395.00
现代采矿手册(上、中、下册)	王运敏 主编	1000.00
深井硬岩大规模开采理论与技术	李冬青 等著	139.00
高瓦斯煤层群综采面瓦斯运移与控制	谢生荣 等著	26.00
地下金属矿山灾害防治技术	宋卫东 等著	75.00
燃烧与爆炸学	张英华 编著	30.00
采空区处理的理论与实践	李俊平 等著	29.00
矿山安全工程(国规教材)	陈宝智 主编	30.00
采矿学(第2版)(国规教材)	王 青 主编	58.00
矿井通风与除尘(本科教材)	浑宝炬 等编	25.00
复合矿与二次资源综合利用(本科教材)	孟繁明 编	36.00
矿产资源开发利用与规划(本科教材)	邢立亭 等编	40.00
金属矿床地下开采(第2版)(本科教材)	解世俊 主编	33.00
矿山岩石力学(本科教材)	李俊平 主编	49.00
高等硬岩采矿学(第2版)(本科教材)	杨 鹏 编著	32.00
矿山充填力学基础(第2版)(本科教材)	蔡嗣经 编著	30.00
碎矿与磨矿(第3版)(本科教材)	段希祥 主编	35.00
现代充填理论与技术(本科教材)	蔡嗣经 等编	25.00
金属矿山环境保护与安全(高职高专教材)	孙文武 主编	35.00
金属矿床开采(高职高专教材)	刘念苏 主编	53.00

目 录

1 深井岩爆灾害研究现状	1
1.1 深井开采岩爆灾害概述	3
1.2 岩爆灾害诱发机理研究现状	6
1.3 岩爆灾害预警研究现状	9
1.3.1 时空分布特征研究现状	9
1.3.2 岩爆灾害 b 值研究	10
1.4 深井开采岩爆灾害预警存在的主要问题	12
1.4.1 监测系统定位精度低	12
1.4.2 大规模较强岩爆灾害预警研究相对较少	14
1.4.3 缺少普适性较强的岩爆灾害孕育过程研究方法	14
1.4.4 矿山对岩爆灾害关切度不够高	15
2 深井开采岩爆灾害孕育机理	17
2.1 引言	17
2.2 开采技术条件	18
2.2.1 矿床水文地质概况	18
2.2.2 原岩应力	22
2.2.3 岩石力学特征	24
2.3 微震事件诱发机理	30
2.3.1 应力诱发微震事件	30
2.3.2 采矿诱发微震事件	37

2.3.3 地质结构面活动诱发微震事件	43
2.4 岩爆灾害前兆信息特征	45
2.4.1 岩芯饼化现象	45
2.4.2 巷道围岩片状剥落现象	46
2.4.3 微震事件前兆变化特征	47
2.5 会泽铅锌矿深部围岩失稳特征	48
2.6 岩爆灾害演化过程	51
2.6.1 岩石受力变形破坏演化过程	52
2.6.2 岩爆类型与岩爆烈度分级	54
2.6.3 岩爆影响因素及形成机理	56
结语	58
3 基于模糊物元理论的岩爆倾向性分析	60
3.1 引言	60
3.2 模糊物元理论原理	60
3.2.1 基本概念	62
3.2.2 关联分析	64
3.2.3 权重的确定方法	68
3.3 岩爆倾向性分析	70
3.3.1 基于模糊物元理论的岩爆倾向性评价的 一般步骤	70
3.3.2 岩爆倾向性评价指标的选取	71
3.3.3 岩爆倾向性评价隶属函数的确定	72
3.3.4 岩爆倾向性模糊物元分析	76
3.3.5 岩爆优劣评价	81

结语	84
4 深井开采岩爆灾害震源机制	85
4.1 引言	85
4.2 震源机制研究现状	86
4.2.1 震源机制基本理论	86
4.2.2 震源机制表示方法	89
4.3 震源机制解的确定	94
4.3.1 双力偶模型基本理论	95
4.3.2 求解震源机制解实例	100
结语	106
5 深井开采岩爆灾害微震监测预测预警研究	108
5.1 引言	108
5.2 微震监测系统构建	109
5.2.1 微震监测系统设计	110
5.2.2 微震监测系统方案优化	116
5.2.3 微震监测系统定位精度分析	119
5.3 预测预警模型的建立	125
5.3.1 微震监测参数的确定	125
5.3.2 微震监测相关参数的幂律特性	127
5.3.3 微震参数与岩体裂隙演化关系	130
5.3.4 模型建立的原则	135
5.4 岩爆灾害预警关键点识别研究	136
5.4.1 常规监测岩爆灾害预警关键点识别	136
5.4.2 微震监测岩爆灾害预警关键点识别	141

5.5 微震监测预测模型研究	146
5.5.1 现场监测数据分析	148
5.5.2 灰色预测分析	149
5.6 微震监测预警模型研究	151
5.6.1 基于微震事件时空分布特征研究	151
5.6.2 基于微震监测事件参数位移变化的预警研究	157
5.6.3 基于微震事件参数视应力变化的预警研究	161
5.6.4 基于微震事件活动率的预警研究	163
5.6.5 基于微震活动性参数 b 值的预警模型研究	164
结语	170
6 基于灰色-突变理论的岩爆预测模型	173
6.1 微震活动时间序列分析	174
6.2 微震监测数据的尖点突变分析	179
6.2.1 突变理论	179
6.2.2 尖点突变模型及稳定判据	182
6.2.3 尖点突变模型模拟岩爆过程的可行性	184
6.2.4 监测数据的尖点突变分析	186
6.3 基于灰色建模理论的岩爆模型	188
6.3.1 $GM(1,1)$ 模型原理	188
6.3.2 微震监测数据的灰色建模	190
6.3.3 模型精度检验	192
6.4 利用灰色-突变模型预测岩爆的一般步骤	193
6.5 模型应用实例	194
6.5.1 微震活动实测	194

6.5.2 监测数据的灰色-突变分析	198
结语	201
7 深井开采岩爆灾害工程控制研究	202
7.1 引言	202
7.2 采矿工艺	203
7.2.1 采矿方法	205
7.2.2 采准工程布置	206
7.2.3 采场布置	207
7.2.4 回采工艺	209
7.3 工程主动控制	210
7.3.1 前期回采顺序存在的问题	212
7.3.2 基于微震监测和数值模拟的回采顺序优化	217
7.4 工程被动控制	223
7.4.1 水砂充填存在的问题	224
7.4.2 膏体充填工艺	226
7.4.3 膏体充填和水砂充填对比	229
7.4.4 膏体充填对采动围岩作用分析	230
结语	233
参考文献	235

深井岩爆灾害研究现状

矿产资源是国民经济和社会高速发展的重要物质基础。人口、资源、环境和灾害是社会经济发展的四个基本影响因素，也是关系人类生存与发展的四大基本问题。据统计，目前我国 92% 以上的一次性能源、80% 以上的工业原料和 70% 的农业生产资料均取自矿产资源。矿产资源开发与综合利用成为我国社会经济发展的重要支柱。我国经济的持续高速发展和全面建设小康社会的进程对矿产资源的开发利用提出更高的要求，而目前的现状却是，我国钢铁缺口总量 30 亿吨，铜缺口超过 5000 万吨，精炼铝缺口 1 亿吨^[1]。据预测，未来 10 年，我国对铜、铝等矿产资源的累计需求总量至少是目前储量的 2~5 倍。

随着国民经济的持续快速发展，我国对金属矿产资源的需求急剧增加^[2]。大部分金属矿产资源对国外资源的依存度增加，当前铁矿石的 75%、铜矿石的 86%、铝土矿的 52% 以上均依赖进口，矿产资源的短缺已成为制约国民经济稳定发展的瓶颈，并对国家经济安全构成严重威胁。随着我国矿产品消费量的不断增长，矿产资源的开发力度也逐步加大。开采条件较好的浅部矿产资源逐渐枯竭，矿山开采逐渐向深部发展。然而，由于矿床水文地质条件和工程地质条件复杂、围岩破碎，矿体埋藏深，矿石品

位低等不利因素,使得我国很多资源难以开采。显然,不利的采矿条件不仅提高了采矿成本、降低了国际竞争力,而且还大大增加了采矿诱发岩爆灾害发生的概率^[3]。

深井开采成为矿产资源开发的必然趋势。由于开采条件日益恶化,使得我国矿山的安全形势更加严峻,事故数与伤亡人数一直居高不下。据国家安全生产监督管理总局统计,近年来我国矿山事故起数在 3401 ~ 5978 起之间波动,死亡人数在 3780 ~ 9050 人之间波动,尽管我国矿山事故起数和死亡人数连续 8 年实现“双下降”,但群死群伤事故仍时有发生,事故总量依然很大,长期以来尚未得到切实有效遏制,已经严重影响到我国矿业可持续发展。

由于浅地表金属矿产资源消耗殆尽,当前我国约有三分之一的金属矿山已经或即将进入深部开采。随着开采深度的增加,深部开采必将遇到高应力、大变形等一系列地压问题,从而诱发岩爆灾害^[4]。为了防止或避免高应力下深部开采岩爆灾害的发生,多年来,我国科研人员针对深部开采岩爆发生机理、预防和治理等开展了一系列的研究工作,并取得了一定的成果,而针对复杂高应力环境下基于微震监测技术的深部开采岩爆灾害监测预警的研究工作还较少。目前,我国金属矿山大多采用声发射技术进行井下安全监测。但是,针对深部开采条件,声发射监测技术存在一定的局限性,不能很好地适应深部开采高应力、大变形和灾害突发性的要求。由于矿山岩爆灾害具有复杂性、多变性与突发性,而致灾载体基本属性的研究不成熟、灾害孕育过程与诱发机理不清楚、灾害预警及防控理论不完善,导致我国深部开采矿山岩爆灾害防控技术严重滞后。因此,研究深部开采岩爆灾害监测预警技术的关键在于:掌握微震事件诱发机理及岩爆灾害发生机

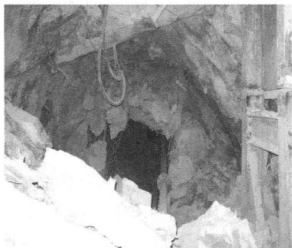
制,识别岩爆灾害预警关键点,提出基于微震监测技术的预警模型,掌握失稳岩体运动规律,给出有效的工程控制措施,从而达到安全高效回采的目的。

1.1 深井开采岩爆灾害概述

矿山动力灾害主要包括矿山开采与地下工程开挖活动中诱发的岩爆、高速滑坡、冲击地压、煤与瓦斯突出、井下泥石流、采空区大面积垮冒、尾矿库崩塌和突水等,是国内外矿山特别是深井矿山开采过程中常见的工程诱发灾害,如图 1-1 所示。Cook^[5]、Salamon^[6]、Ortlepp 和 Stacey^[7]将岩爆灾害定义为人工开挖导致岩体开挖面破坏诱发的微震事件。

矿产资源开发由浅向深发展是客观的必然趋势。1980 年我国煤矿平均开采深度为 288m,2000 年为 500m,20 年内开采深度增加为 212m,平均降深速度约为 10m/a。原煤炭部 1995 年初对 599 个国有重点煤矿开拓参数的调查结果显示,未来开采深度小于 400m 的浅矿井数目将大为减少,400~800m 的中深矿井开采数目将明显增加,800~1200m 的深井开采数目将成倍增加,并将出现一批超过 1200m 的特深矿井。我国埋藏在 600~1000m 以下的煤炭资源达 83%,伴随着全面大规模进入深部开采,地下采空区容积也必将不断增大,岩爆(冲击地压)灾害将逐步显现^[8~10]。

大量事实证明,随着开采深度和地下特大采空区的增加,深井开采岩爆灾害诱发的可能性和频度、强度将同步增强。开采工作面 and 巷道附近的岩爆灾害对采矿人员的生命和矿井安全构成很大威胁,强岩爆灾害还将造成工程损失、破坏人居环境和对公共安全构成威胁。因此,深入开展深井开采岩爆灾害研究和治理意义重大。



(a)



(b)

图 1-1 岩爆灾害

(a) 岩爆; (b) 井下突水

金属矿和煤矿岩爆（冲击地压）灾害是现阶段我国矿山动力灾害中的最主要部分^[11]。我国井工煤矿占 95%，平均采深达 400m 以上。与世界主要产煤国相比，我国煤矿地质构造复杂，矿井事故多发，平均百万吨死亡率在 6 左右，是美国的 145 倍，年死亡人数在 6000 人左右，是全球其他产煤国家死亡人数总和的 3

倍。与同属发展中国家的邻国印度（百万吨死亡率 0.42）相比，我国煤矿百万吨死亡率仍高出 13 倍。近年来，虽然关闭了数万个乡镇煤矿，但我国煤矿伤亡事故的严重局面仍然没有得到有效控制。矿井因采动引起的煤与瓦斯突出、突水、冲击地压、冒顶等事故仍然频繁发生，死亡超过 10 人的重大瓦斯爆炸和透水事故在地方煤矿和部分国有重点煤矿中时有发生。尤其近几年国有煤矿在装备投入不足（特别是安全检测和决策手段短缺）的情况下盲目扩大生产，发生了几十起伤亡数十人到数百人的重大恶性事故。自 2005 年以来，我国煤矿矿难发生的一个重要特点是：南部地下突水，北部瓦斯爆炸。国有大中型煤矿发生岩爆灾害事故所占的比重明显加大，“大矿大难”已显现为一种趋势。

近年来，我国非煤矿山每年事故死亡人数约占工矿商贸企业事故死亡总数的四分之一。而澳大利亚矿山每年的死亡人数不超过 20 人；美国矿山生产事故的每百人死亡率从 1920 年的 0.321 降低到 1996 年的 0.0296，2002 年美国非煤矿山生产事故的死亡人数为 40 人，由此可以看出我国矿山安全生产水平与发达国家之间存在巨大的差距。如图 1-2 所示为我国 2001 ~ 2009 年较大事故累计死亡人数比例统计。

随着我国人口的持续增长和国民经济的高速发展，人们对矿产资源的需求量也日益增加，复杂难采和深部开采诱发的安全问题日益突出，岩爆、煤与瓦斯突出、滑坡等重大的工程地质灾害和事故隐患骤增，严重制约着矿产资源合理的开发与利用。多年来尽管我国已经开展了大量矿山岩爆灾害机理和防治技术的研究，但目前我国矿山安全生产形势依然严峻，如果短期内不能在矿山岩爆灾害孕育机理、预警和控制方面有所突破，其势必成为制约矿山（特别是深井开采矿山）发展乃至我国国

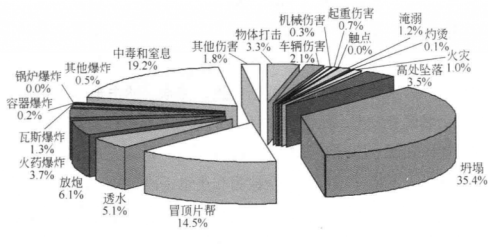


图 1-2 我国 2001 ~ 2009 年较大事故
累计死亡人数比例统计

民经济可持续发展的瓶颈。

1.2 岩爆灾害诱发机理研究现状

深井开采岩爆灾害涉及岩爆、井下突水和瓦斯突出等诸多工程问题，准确掌握其发生的前兆特征直接关系到井下人员和设备的安全。根据深井开采岩爆灾害的现场前兆特征，选择较好的分析方法是一项非常重要的工作。目前，研究岩爆灾害前兆特征的方法相对较少，而且各有不同的侧重点。国内外在这方面的研究工作主要如下：

尹贤刚^[12]通过岩石加载全应力应变曲线室内试验，发现一次性加载过程中出现明显的“耗时”现象，并且在此阶段声发射事件率出现明显下降。而对于脆性破坏岩石来说，这一阶段则基本不存在明显的“耗时”现象。张省军^[13]利用单轴加载方式，研究发现在初始加载阶段，声发射数量很少；在岩石弹性变形阶段后期和塑性变形阶段，累计声发射数快速增加；声发射能量在

岩石破裂过程中相当长的一段时间内保持低释放率,而在破坏前释放明显。张茹、李元辉^[14,15]在室内试验基础上,研究了岩石破坏过程中声发射 b 值的变化趋势,提高了现场岩体稳定性监测的准确性。龙辉^[16]建立了斜坡演化的非线性动力学模型;利用梯度系统与突变模型的等价性,通过变量代换得到标准的尖点突变模型。Zhao^[17]研究了煤突出的声发射和红外热辐射相关性,认为在应力峰值的 0.9 和 0.82 处是应力关键点。

在国外,Lei^[18]研究了岩样破坏的声发射事件时空分布特征,发现在加载过程中试样沿不均质断层发生动力破坏;基于试验数据,推断导致岩样失稳前兆特征和不均质断层属性有关。Mckinnon^[19]研究发现剪切应变发生区域(断层)不断演化,以至断层、应力及边界变形有密切的交互作用。

随着矿山开采深度的增加,岩爆灾害活动越来越频繁,发生范围越来越广,破坏程度也越来越严重。因此,非常有必要对岩爆灾害微震事件诱发及孕育机理进行深入研究。目前,国内外对此的相关研究如下:

姜耀东等人^[20]建立了基于非平衡热力学和耗散结构理论的煤岩体非线性失稳机理的分析模型,煤岩体整体失稳三维模型、考虑煤岩体损伤的动力失稳模型和结合 Hoek-Brown 强度理论的煤岩冲击动力失稳模型。李铁等人^[21]探索了采矿诱发地震孕育的机理。他以抚顺老虎台煤矿为研究背景,基于双力偶点源的震源模型理论,用地震波 P 波初动方法,求解出 27 个较强矿震的震源机制;结合区域强地震震源机制解、地方震小震综合断层面解和极近场矿震震源调查,分析矿震的孕育环境;对非双力偶型矿震提出了煤柱失稳和顶板较大规模下沉的解释。邹德蕴^[22]应用能量传递原理和能量守恒定律,结合对岩体性状组织损伤弱化的分析,

提出了煤岩体发生冲击效应的理论,推导了冲击效应方程;结合冲击效应学说与能量方程,以不同的方法分析论述了灾害的形成机理。刘滨^[23]采用试验研究和数值分析相结合的方法,建立了可以反映岩爆孕育发生过程的本构方程;研究了具有岩爆倾向岩石的声发射活动规律,研究了微震与岩爆的内在联系。

在国外,Trifu^[24]研究发现微震事件的迁移主要是由应力重分布引起的,微震群集与主要洞穴坍塌有关,而次要的微震群集与较小规模的破坏有关。Scotti^[25]将大规模流体注入花岗岩体中发现主应力呈现非均匀性,当注入流体时,沿着断层面进行剪应力释放,微震事件的缺失和断层面的形状有关,说明发生断层滑动是准静态的。Trifu^[26]还发现:震级小于0的微震事件可以被用来评估一个2.9级的破坏性岩爆事件,应力反演和主量化组分分析具有很好的相关性,可以用来推导微震破坏面和结构图。Arasteh^[27]发现声发射可用来监测材料破坏孕育过程,可以用定量的波形分析微震事件震级和断裂机理。声发射事件发生在加载过程中破裂尖端方向,同时,宏观破裂处发生卸载事件。典型的加载事件本质上是出现在拉应力区,同时卸载事件通常是剪应力的组分。

从上述国内外对于深井开采岩爆灾害诱发机理的研究来看,目前的研究工作主要是对单轴条件下的室内试验进行分析、总结或模型的推导,其中主要包括岩石破坏前的耗时、分布特征等,并取得了具有一定价值的成果。但是,深部开采岩体处于复杂应力环境条件下,多重因素会导致岩爆灾害的发生,室内试验仅是现场的特殊情况,现场实际发生的岩爆灾害与室内试验有着一定的区别。目前,采矿界对深井开采诱发岩爆灾害的机理认识仍不够深入,尤其是开采导致应力重分布,引起岩体受力和断层活动

诱发微震事件的研究尚有不足的地方,还需要在实际生产应用中进一步研究。因此,充分利用监测手段分析岩爆灾害前兆信息特征、影响因素、形成机理、微震事件诱发机理及岩爆灾害预警关键点便显得尤为重要,对其也有待于进一步深入研究。

1.3 岩爆灾害预警研究现状

1.3.1 时空分布特征研究现状

采矿活动过程中诱发的微震事件时空分布规律,可以采取对一段时间内不同区域的微震事件的分布特征,以及在一定区域内不同时间的微震事件分布特征进行分析。掌握开采扰动形成的微震事件时空分布特征,有助于进行岩爆灾害预警,对指导微震事件发生异常区域内工作人员和设备的撤离、降低短期内人员作业的风险具有重要的意义。

杨志国^[28]基于一段时间内监测到的有效事件,对井下首采区地震事件的时间与空间分布进行了研究,结果表明在爆破后2h内微震事件比较活跃,应该尽量避免集中爆破。徐奴文^[29]利用监测系统对拾取的事件波形进行分析和聚类研究,初步圈定左岸边坡微震活动引起深部岩体变形的区域。袁子清^[30]运用统计学和线性拟合方法研究矿震事件的时空分布规律。

在国外,Whyatt^[31]利用某种地质特征,研究了控制矿震事件和岩爆危险区的空间分布特征;研究数据表明首次遇到岩爆风险时最容易导致事故伤害,当矿工对这种情况采取相应措施后此风险也很容易控制。Styles^[32]研究发现矿震的时空分布变化与工作面的开掘和继续开挖等有紧密的关系:事件发生于岩体表面,与活动裂隙有关,事件发生在生产开始阶段并停止于生产结束时,

与工作面的推进和震源位置有很好的相关性。Eneva^[33]对事件发生地点和时间进行了空间分布和事件空间聚集度计算;认为事件的时间分布代表固定数目事件的发生事件间隔。地震的前兆(下降值)更容易在地震频率中随意观察到,在大型事件发生前同时看到空间聚集度的升高和降低。Senfaute^[34]对微震事件空间分布的详细研究证明事件发生的位置、矿山开采应力状态的改变与开采分布有一致相关性。Coulson^[35]根据两个矿山矿震时空关系,对比分析了岩体破裂峰前和峰后的力学行为,发现岩石峰后逐渐破裂的微震事件时空分布和发生密度特征,根据空间监测数据表征屈服区程度和发展趋势,以及破裂过程的重要阶段。

从上述国内外对岩爆灾害时空分布规律研究方面来看,相关研究主要集中在室内试验岩石破裂过程微震事件时空分布规律分析,或者仅是现场微震事件时间或空间变化规律分析,并没有对深部开采岩爆灾害微震事件随回采活动的微震事件时空分布变化特征进行分析总结,存在一定的局限性。因此,在该方面也有待于进一步研究。

1.3.2 岩爆灾害 b 值研究

许多观测表明,由开采扰动诱发的微震事件与天然地震事件遵循同样的规则,即古登堡-里克特引入的频度-震级关系,该关系适用于所有的震级范围。根据深井开采微震事件分布特征,通过微震监测数据,利用该关系能够获得岩体微破裂的分布状态,并判断潜在的矿山岩爆灾害活动规律,进而实现预警。因此,开展深井开采诱发微震事件活动性参数 b 值与分形之间的关系研究,揭示岩体失稳破坏和 b 值分布特征的关系具有非常重要的意义。

李小军^[36]由扫描算法求得试件变形全过程的声发射 b 值动态

曲线。研究认为,声发射 b 值在岩石加载前期和中期阶段总体呈上升趋势,上升过程中有不同程度和次数的起伏;仅依靠声发射频率和强度参数并不能完整准确地反演岩石内部结构,也不能实现对岩石失稳破坏的预警。李元辉^[15]通过单轴受压岩石破坏声发射试验,对岩石破裂过程中的声发射 b 值和空间分布分形维值随不同应力水平的变化趋势进行了研究。张省军^[13]研究了 b 值随时间的变化规律,发现在岩石失稳破坏前, b 值出现快速下降现象,多数岩石试件声发射 b 值在岩石破坏前下降到最低值。刘宗燕^[37]通过对鲍店煤矿实际矿山地震分析,应用 $G-R$ 关系,计算出矿山地震的 $G-R$ 关系曲线,做出参数 a 、 b 值变化曲线,并把 b 值变化与实际矿震中大震个数与小震个数比值进行比较,发现两者变化趋势相反,而 a 值与 $\lg n$ 比较,变化一致,两者存在紧密的关系,证明 a 描述了矿山地震总体活动性水平。李铁^[38]基于中尺度地震实验场高密度数字地震和潮汐形变台网的现场观测,用地震学方法和小波工具分析了强矿震过程中采集到的数据,发现震前短临阶段存在可信的 b 值、 η 值、频度等地震学异常和定点潮汐形变前兆异常;对异常信息的提取方法和强矿震短临阶段的预测进行了探讨。

在国外,Carpinteri^[39]通过实验室研究发现:岩石受压状态,当 $b=1.5$ 时,发生中等破坏;当 $b=1.0$ 时,发生强烈破坏。Trifu^[40]研究发现微震震级 M 值为 $-1.1 \sim -0.4$,且 b 值衰减的空间变量与计算增加的压力消除值密切相关;研究表明岩爆发生在估算的时空 b 值显著减小之前,其起因于与较小的震级事件相关的较大微震事件的发生。Mckinnon^[19]研究发现剪切应变发生区域(断层)不断演化,断层、应力及边界变形有密切的交互作用。这些区域中的断层滑移通常是分散的,并且符合古登堡-里克特定

律震级频率分布。Trifu^[40]基于罗马尼亚 Ocnele Mari 地下巨大洞穴,采用持续的微震监测,微震频率分布表明 b 值约为 1.5,时间变量从 0.5 至 1,起初属于坍塌呈线性破裂,继而导致二维剪切破坏和 3D 破坏过程。Carpinteri^[39]研究了在岩体演化破坏过程中的两种不同 b 值的解释:一种是破坏重心的空间分布,一种是破坏长度分布。

在岩爆灾害微震事件 b 值研究方面,国内外研究主要集中为室内试验研究。针对深井开采的工程实际情况,积极开展与深井开采岩爆灾害相适应的 b 值非线性分布特征研究,进而指导生产,目前尚有待进一步探索。

1.4 深井开采岩爆灾害预警存在的主要问题

深井开采微震监测技术在国内还没有广泛应用,并且在理论研究方面也还不够成熟,这些问题已成为制约深井开采岩爆灾害微震监测技术快速推广应用的瓶颈。现阶段存在的具体问题如下所述。

1.4.1 监测系统定位精度低

衡量一套监测系统的性能和可靠性的指标关键是其定位精度,以及满足定位精度要求是否一致。通过震源定位,可以进一步分析微震特性,确定震动破坏区域,预测微震活动发展趋势,评价岩体破坏失稳的风险。因此,震源定位的准确性至关重要。

天然地震与矿山地震之间没有本质的区别,矿区早期微震监测的方法技术便是直接引用于天然地震监测手段,甚至有的矿区冲击地压监测和分析主要就依靠当地地震台网,但区域地震台网密度不足,矿震定位精度较低。由于岩爆灾害是矿山特有的微震

活动,震源破裂尺寸(震源半径)远小于天然地震,破裂时间短,震动频次高,要求震源定位的精度较高,因此早期微震监测的定位精度远不能满足岩爆灾害的需要。定位精度依赖于微震台网的空间网络优化布置、地震波拾取的灵敏性和准确性、速度模型假设等多种因素。近年来,随着最小二乘法、Bayesian 定位法、相对定位法等定位技术的发展,以及地震台网优化布局,矿震震源定位精度逐步提高^[41-44]。微震监测系统对微震事件的定位原理如图 1-3 所示。

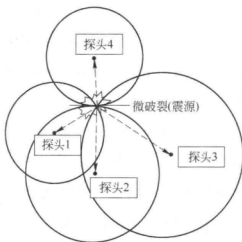


图 1-3 微震事件定位原理

现阶段,我国煤矿和非煤矿山的声发射或微震监测系统安装速度和数量逐步提高。然而,微震监测系统硬件在井下恶劣的环境下,容易发生电子元器件腐蚀、短路。因此,在深井开采潮湿环境下,矿山微震监测系统硬件维护就显得非常重要。正因为如此,矿山专用的、持续有效的矿震观测网络不多,高精度观测台网更少,绝大多数矿山没有建立实时微震观测系统,仅靠井下宏观调查统计来预测岩爆灾害。根据现场实测结果,现有的声

发射或微震监测系统在水平方向上的定位精度虽可达到米级,但在铅直方向上的定位误差却达几十米,甚至上百米,总体定位精度依然难以满足安全生产需求。所以,岩爆灾害监测系统定位精度低是需要解决的首要问题。

1.4.2 大规模较强岩爆灾害预警研究相对较少

新中国成立 60 多年来,我国已逐步发展成为采矿大国,特别在非煤矿山开采方面取得了长足的进展,使我国的经济发展和科学技术变革不断进步。预计“十二五”时期,我国经济将继续保持平稳较快发展势头,安全生产科技面临重大挑战和巨大需求矛盾。随着资源的减少和枯竭,绝大多数矿山从露天开采转为地下开采、从地下开采转为深部开采,剩余资源的开采技术条件越来越复杂。随着矿产资源开发逐步过渡到深部开采,水压、地压、地温、瓦斯压力都相应增加,煤与瓦斯突出、冲击地压等灾害的复杂性和治理的难度将加大;随着工业化进程的加快和产业生产规模的日益扩大,生产装置的复杂性与危险性也将不断增大。由此,矿山安全生产面临着巨大考验^[45]。

目前,深井开采方面的研究绝大多数是针对采场范围的声发射或微震监测来开展的,而涉及深井开采较大规模、较强区域性岩爆灾害预警及控制研究相对较少。

1.4.3 缺少普适性较强的岩爆灾害孕育过程研究方法

矿山岩爆灾害的研究表明,不管是非煤矿山的矿山岩爆、坍塌和矿震等灾害问题,还是煤矿的煤与瓦斯突出(或涌出)和冲击地压等问题,都是矿山开采过程中应力场扰动而诱发岩体微破裂萌生、发展、贯通后岩石破裂失稳的结果。即使是不伴有大规模

模岩爆灾害导致的重大事故,也多是因为微震震源应力场的变化诱发了大量微裂纹的萌生或贯通所造成的。因此,不管是哪种矿山岩爆灾害类型,多数情况下,在岩爆灾害出现之前,都有微震活动前兆。而诱发微震活动的直接原因则是岩层(煤层)中应力或应变增加的结果。但现阶段,在一个矿山或矿区得出的规律和方法往往在另一个矿区并不适用或不完全适用,从而缺少一种普遍适应的岩爆灾害孕育过程的研究和防治方法^[46-52]。

1.4.4 矿山对岩爆灾害关切度不够高

在国外,微震监测技术的发展已使矿山岩爆灾害监测从“难以实现的奢望”转变为采矿安全管理的一个有机必要组成部分。如南非、美国、加拿大、俄罗斯和澳大利亚等国的深井矿山已经利用微震监测系统指导矿山生产决策,实现了矿山开采实时监测。在发生微震活动的区域内布设传感器,可以探测微破裂所释放出的弹性波,确定微震事件发生的位置,还可以给出微震活动性的强弱和频率,通过微震监测获得微破裂的分布位置,判断潜在的矿山岩爆灾害活动规律,进而实现预警。由于微震监测系统监测范围可大可小,其已成为矿山开采诱发岩爆灾害监测的主要技术手段。

目前,我国在矿山安全生产科学实践中,对矿山灾害的成因、破坏程度和防治方法等方面已有了初步研究,并取得了部分研究成果,对解决矿山安全生产中的重大安全问题起到了一定的作用。在取得技术进步的同时,我国矿山安全生产形势依然严峻,安全事故频发,而矿山安全科学技术进展缓慢,使得我国矿山安全生产科学技术水平较低;矿山安全生产科学技术发展严重滞后国民经济和社会的发展,同时与发达国家的差距进一步扩

大,尚不能为矿山安全生产提供足够的支撑和保障^[53]。目前,已有非煤矿山近 10 万座,非煤、非油气矿山的工业总产值超过 1001 亿元,但非煤矿山的安全生产形势依然严峻。面对非煤矿山严峻的安全生产形势,实施科技兴安战略,对非煤矿山安全生产科技发展合理规划,加强非煤矿山安全生产科技工作,提升我国非煤矿山的安全生产技术水平已迫在眉睫。矿山发生灾害,以及矿难出现各种各样的乱象,究其原因主要在于人员重视程度不够,仍然存在法制意识淡薄、瞒报下井人数、人为关闭井下监测设备以及监测(检测)设备安装不到位等多种现象,虽然法律法规还有待完善,但只要认真落实已有的规章制度,大部分矿难都可以消灭于萌芽状态。可以说矿难最直接的原因,是规章制度形同虚设、法律法规没有落实到位以及监管机制有缺陷,根本原因则是矿山对岩爆灾害重视程度和关注度不够^[54]。

这种不良的趋势和现状,已经引起党中央和国务院的高度重视。国务院总理温家宝 2005 年在阜新孙家湾“2·14”矿难后(2005 年 2 月 23 日)主持召开的国务院常务会议上,研究部署加强煤矿安全生产工作,痛下决心,标本兼治,采取七项措施开展瓦斯集中整治,坚决防范煤矿重特大事故的发生。2010 年 7 月 19 日,国务院印发了《关于进一步加强企业安全生产工作的通知》(国发[2010]23 号),就进一步巩固发展安全生产形势、重点解决当前安全生产暴露出的突出问题、切实强化企业安全生产主体责任落实等方面做出了具体要求。矿山有待于按照文件详细落实,其中的关键便在于提高对事故的重视程度。

深井开采岩爆灾害孕育机理

2.1 引言

随着矿山浅部资源的逐渐枯竭,深部开采将成为矿业可持续发展的一种必然趋势,采深的不断加大必然带来更加频繁的岩爆灾害。岩爆灾害具有强烈的突发性和破坏性,对井下人员及设备的安全威胁极大,严重地制约了矿山的安全生产^[55]。会泽铅锌矿矿区8号矿体赋存条件极为复杂,开采深度超过1500m,是目前全国开采深度最大的金属矿山之一;矿区地处云贵高原的峡谷地区,导致原岩应力较高,岩体主要由压应力和剪应力导致岩体裂纹压密、扩展、贯通直至失稳。所以,在该环境下,微震事件经常发生在脆性岩石裂纹扩展位置和不连续结构面处,是岩体内部潜在和蓄积能量释放的表征。微震活动是岩体变形和破坏的响应,能量释放是微震波向外界辐射的结果。矿区8号矿体已发生过局部小规模岩爆,给回采安全带来的问题也越来越严重。为了提高基于微震监测技术的深井开采岩爆灾害预警的准确性,进一步研究深井开采导致微震事件诱发机理、岩爆灾害演化过程就显得尤为重要。

在复杂开采技术条件下,为了解决大规模岩爆灾害关键技术

难题,需要分析深部开采岩爆灾害前兆特征,总结围岩失稳模式,探索深井开采岩爆灾害演化过程和微震事件诱发机理,为深井开采岩爆灾害预警技术研究奠定基础。

2.2 开采技术条件

2.2.1 矿床水文地质概况

会泽铅锌矿矿区北起龙王庙,南至车家坪一线,西起麒麟厂逆断层,东至牛栏江、银厂坡逆断层一线,面积约 10km^2 。矿床位于扬子准地台西南缘,滇黔褶断区的西部,滇东北褶断东南东部东川—镇雄构造带中的会泽金牛厂—矿山厂成矿带上。矿区的矿床地层及构造特征、矿体及围岩特征、水文地质特征如下所述。

2.2.1.1 矿区及矿床地层、构造特征

矿区上古生界地层发育完整,下古生界地层缺失寒武系中上统,奥陶系、志留系及泥盆系下统。泥盆系中上统地层在龙王庙以南出露,上古生界石炭系、二叠系地层分布广泛,峨眉山玄武岩沿麒麟厂逆断层在矿区西南部大面积出露,在中部有少量风化残积物。

矿区构造以发育北东—南西向褶皱与断层组成背斜为特征。北东—南西向的断层是矿床重要的控矿构造,矿山厂、麒麟厂、银厂坡断层组成三重叠瓦状构造,断层具多期活动之特点,与成矿关系密切。该构造分别控制矿山厂、麒麟厂、银厂坡三个矿床,如图 2-1 所示。

矿区范围内共揭露断裂 12 条,规模较大的为 F_7 、 F_{7-1} , 水平

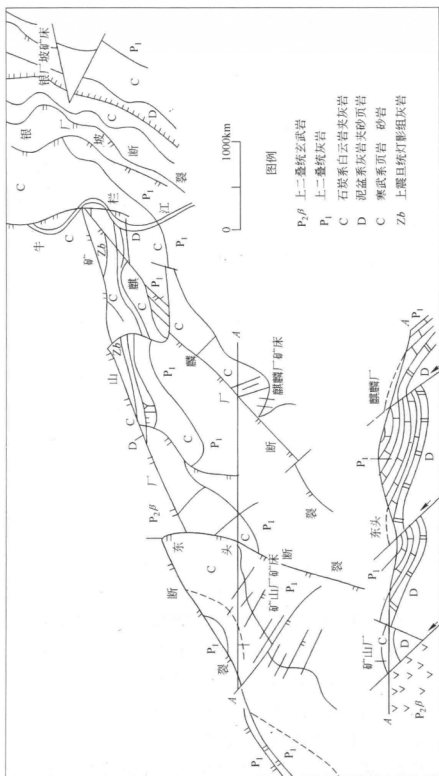


图 2-1 会泽铅锌矿矿区地质构造图

错距为 20m, 但此断裂已位于矿体范围之外。与矿体有关的断裂有 7 条, 但规模都较小, 水平错距 1~4m, 对矿体产状及矿体完整性影响不大。

2.2.1.2 矿体及围岩特征

8 号矿体赋存于下石炭统摆佐组上部粗晶白云岩中, 矿体顶、底板与围岩界限清楚, 沿层产出。矿体产状与地层一致, 走向 $N20^{\circ} \sim 40^{\circ}E$; 倾向 SE; 倾角 $61^{\circ} \sim 63^{\circ}$ 。

8 号矿体在剖面上呈层状-似层状, 平面上为透镜状。总体空间形态呈条带状向南西侧伏。

8 号矿体水平厚度 2.5~18.8m, 平均水平厚度 9.93m。平面上为中部厚大, 沿走向端部变薄或分枝尖灭; 剖面上为上部薄或分枝尖灭, 向深部逐渐变厚。矿体沿走向和倾斜方向延伸稳定, 未见无矿天窗, 仅在厚度上局部有一些小的膨胀和收缩, 属于产状、形态都较稳定的矿体。

2.2.1.3 水文地质特征

麒麟厂矿区位于矿山厂一者海水文地质单元北东部一条次级分水岭东侧斜坡地带。坡向与岩层倾向大体一致, 倾向 SE, 坡度较陡为 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$, 属大气降水渗入补给区, 但地形条件不利于大气降水的渗入。东临牛栏江, 江面标高 1561m, 为当地最低侵蚀基准面。矿体到牛栏江平距约 900m, 工业储量位于 1571m 以下, 储量计算底界标高 1167m, 第一期预计开拓两个中段, 即开拓至 1451m 水平。目前开拓的最低坑道为 1571m 中段, 是现在和今后矿坑水自流排入牛栏江的唯一排水巷道。

矿区的水文地质隔水边界条件较好, 处于狭长条带状充水含

水层中。距矿体顶板 30m 左右,与牛栏江之间有梁山组-马坪组隔水层,为东部矿床顶板隔水边界,可以阻隔牛栏江水及上覆栖霞茅口组岩溶裂隙含水层地下水的灌入。距矿体底板约 440m,为麒麟厂逆断层,该断层具有局部阻水性质,其西部重复出露梁山组-马坪组隔水层,为西部矿床底板隔水边界,可以隔断隔水层以西含水层地下水与矿床充水含水层的水力联系。沿矿床充水含水层走向两端虽可与牛栏江大角度相交,但是矿体沿充水含水层走向方向距离牛栏江较远,水平距离大于 3km,在开采深度不大的情况下,可视为无限补给边界。

矿区位于区域水文地质单元的补给径流区,大气降水是地下水的主要补给来源。矿床充水含水层沿北东南西向展布,呈狭长条带状,具层间径流的特点。南北走向的东头断裂横切麒麟厂断裂及矿床充水含水层,受东头断裂上盘裂隙径流(富水)带的控制,地下水总体由北向南径流至矿区南部黑鱼洞 904 号岩溶泉集中排泄,距离矿床平距大于 8km,是主要排泄区,矿区北东部龙王庙 10 号泉等为其次要分散排泄泉点。根据水样分析结果,地下水矿化度低、硬度低,以及 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等离子含量低,这也是矿区地下水循环剧烈,补给、径流、排泄条件良好的一个佐证。

矿坑涌水量随季节降雨量变化显著,干季涌水量明显小于雨季涌水量,矿坑涌水量变化幅度大,地下水动态受大气降水控制。

1571m 中段 8 号矿体与 10 号矿体之间(70~94 号勘探线)断裂、节理裂隙不甚发育,坑道多为干燥区,其赋水性、透水性相对较弱,在矿体地段断裂、节理裂隙相对发育,其赋水性、透水性相对较好。沿充水含水层走向方向断裂、节理裂隙的发育表现为裂隙密集带、裂隙稀疏带,一般裂隙密集带赋水性、透水性

较好,裂隙稀疏带透水性、赋水性较弱。富含不均匀岩溶裂隙水,富水性弱至中等。

矿区断裂构造较发育,以麒麟厂断裂(NE向)和东头断裂(SN向)是区内主干断裂,东头断裂横切麒麟厂断裂及矿床充水含水层,构成矿区构造控水的格架。两主干断裂再与富水性不强的NE、NW、NNW、近SN和近EW向次级断裂组成地下水的交替循环系统。断裂构造切割含水层,沟通含水层的水力联系,岩溶多沿其发育,形成地下水的蓄存空间和运移通道,对矿床充水有一定影响。

2.2.2 原岩应力

2.2.2.1 地应力方向的确定及取样

根据会泽铅锌矿上部中段所进行的原岩应力测试^[56],以及地质力学方法可以确定该矿深部的主应力为水平应力。所以,原岩应力直接测试方向为N20°E、S70°E和铅直方向,水平方向倾角为0°,铅直方向为-90°。

目前,由于需要测定8号矿体开采区域应力场分布特征,故在1391m、1261m中段采取岩芯以准确确定地应力的大小。取样岩芯为白云岩与灰岩,根据所确定的地应力方向,三个取样方向为N20°E、S70°E和铅直方向。在未回采区域,取样深度达50m,每个方向取10块试样。

2.2.2.2 实验与结果分析

在MTS刚性压力试验机上,进行了Kaiser效应地应力测试实验。整个过程采用等位移控制加载模式,加载速率为 2×10^{-6}

mm/s, 并用 DYF-2 智能地音仪测定岩石声发射事件。

对实验结果的分析可采用两种方法来寻取 Kaiser 效应点^[57,58]:

(1) 直接法。根据声发射事件随时间的分布状况, 确定 Kaiser 效应特征点, 再根据特征点发生时间来计算出其对应的应力。

(2) 间接法。利用岩石在受压过程中声发射事件的积累数和压应力的关系曲线, 在关系曲线上找到对应的 Kaiser 效应特征点。

本次实验主要采用第二种方法来处理实验数据。

结合前期原岩应力测试结果, 分析了 8 号矿体最大主应力、最小主应力和铅直应力随矿体埋深的变化关系, 如表 2-1 和表 2-2 所示。

表 2-1 8 号矿体不同中段原岩应力测试结果

矿 体	中 段	应力值/MPa			埋深/m	备 注
		N20°E	S70°E	铅直方向		
6	1751m	17.06	9.74	10.88	565	6 号矿体位于 8 号矿体上部, 属同一矿床
	1691m	17.09	10.47	11	585	
	1571m	20.15	10.54	17.86	627	
8	1391m	22.1	18	21.5	1147	
	1261m	26.4	22.3	25	1277	

表 2-2 8 号矿体不同应力方向拟合方程

应力方向	拟合方程	标准差 S	相关系数 r	备 注
N20°E	$y = 11.7173 + 0.0105x$	$S = 1.707$	$r = 0.926$	最大主应力
S70°E	$y = 0.5462 + 0.0163x$	$S = 0.9347$	$r = 0.9896$	最小主应力
铅直方向	$y = 3.1499 + 0.0168x$	$S = 2.9132$	$r = 0.9159$	中间应力

根据测试结果分析, 最大主应力方向为矿体走向方向, 从

17.06MPa 增加到 26.4MPa, 应力值随矿体埋深的变化关系如图 2-2 所示。最小主应力方向为矿体倾向方向, 从 9.74MPa 增加到 22.3MPa, 应力值随矿体埋深之间的关系如图 2-3 所示。

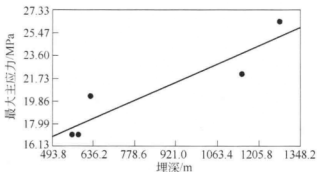


图 2-2 最大主应力随矿体埋深的变化关系

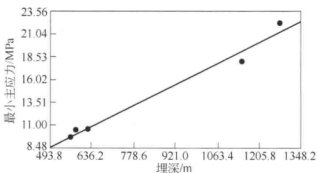


图 2-3 最小主应力随矿体埋深的变化关系

中间主应力方向为矿体铅直方向, 从 10.88MPa 增加到 25MPa, 应力值随矿体埋深的变化关系如图 2-4 所示。测试过程中声发射事件数与应力关系如图 2-5 所示。

2.2.3 岩石力学特征

2.2.3.1 试验原则和内容

岩石物理力学参数是采矿设计、岩体稳定性分析和评价等所必

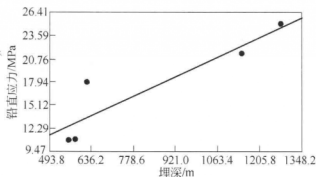


图 2-4 铅直应力随矿体埋深的变化关系

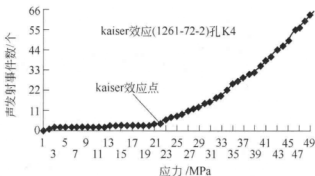


图 2-5 声发射事件数与应力关系

需的基础资料。为了获得全面、可靠的矿岩物理力学参数，需对会泽铅锌矿 8 号矿体深部矿岩物理力学参数进行测试。本次试验在中南大学现代分析测试中心力学实验室进行。该实验室属教育部重点实验室，拥有国际先进的测试分析设备。试验涉及膏体、硫化矿、氧化矿、 C_2w 、 C_1b 、 C_1d 和 C_3m 共计 7 种材料类型，所测试的指标包括密度、弹性模量、泊松比、单轴抗压强度、抗拉强度和声波速度。

试验依据的标准是《工程岩体试验方法标准》（中华人民共和国国家标准 GB/T 50266—1999），并参照《公路工程岩石试验规程》（行业标准 JTG E41—2005）及《水利水电工程岩石试验

规程》(行业标准 SL264—2001) 执行。

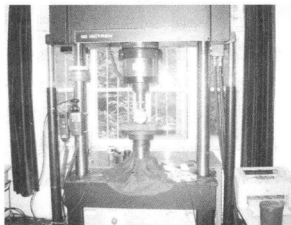
依据研究目的, 确定进行的测试项目为: ① 密度试验 (块体密度); ② 单轴抗压强度试验; ③ 变形试验; ④ 抗拉强度试验; ⑤ 岩块声波速度测试; ⑥ 弹性模量; ⑦ 泊松比。

2.2.3.2 试验仪器设备

力学试验采用的主要设备为液压伺服控制试验机 (见图2-6),



(a)



(b)

图 2-6 INSTRON 液压伺服控制试验机

(a) MODEL-1346; (b) MODEL-1342

型号为 INSTRON-1342 (最大荷载 25t)、INSTRON-1346 (最大荷载 200t), 由英国生产, 为国际顶级力学试验系统。该试验机带有多个不同级别的压力传感器, 具有极强的载荷控制能力, 单轴抗压试验时可做出全应力-应变曲线。

2.2.3.3 试验结果分析

本次试验共使用岩石试样 45 个, 按照岩石力学试验规程, 在中南大学现代分析测试中心力学实验室, 对会泽铅锌矿与采矿工程稳定性关系较为密切的 7 种主要矿岩的物理力学参数进行了较为全面的测试。通过试验, 获得了矿岩的块体密度、弹性模量、泊松比、单轴抗压强度、抗拉强度和纵波速度等物理力学指标, 最终结果汇总于表 2-3 中。

表 2-3 矿岩物理力学参数测试结果汇总

岩 性	块体密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	弹性模量 /GPa	泊松比	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强度 /MPa	纵波速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
膏 体	1.660	1.424	0.286	6.759	0.423	1993
硫化矿	4.086	15.090	0.254	86.241	3.007	4174
氧化矿	4.569	14.615	0.251	85.883	4.124	4280
C_2w	2.797	17.798	0.244	74.677	6.076	5102
C_1b	2.780	17.172	0.262	68.655	3.071	5016
C_1d	2.708	16.349	0.267	104.113	4.443	4955
C_3m	2.525	8.288	0.275	20.126	1.389	3063

根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—1999), 测干密度时每组试验的试件数量不得少于 3 个。本次块体密度测试的试件数, 每种矿岩均为 3~5 个, 全都采用单轴抗压试验的试

件。从表 2-3 中可以看出, 7 种矿岩中, 氧化矿的密度最大, 硫化矿的密度次之, C_2w 、 C_1b 和 C_1d 三种岩石的密度相差不大, C_3m 的密度较小, 膏体的密度最小。测试结果的离散性比较小, 测试结果正常。

试件的高径比(高度与直径的比值)对试验结果有一定的影响。《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—1999)和《水利水电工程岩石试验规程》(SL264—2001)这两个规程中, 规定试件的高径比为 2.0~2.5;《公路工程岩石试验规程》(JTG E41—2005)中规定试件的高径比为 2.0。在室内岩石力学测试实践中, 通常将高径比为 2.0 的试件视为标准试件。当试件的高径比不是 2.0 时, 为了便于对单轴抗压强度的试验结果作统计分析, 需要将任意高径比的抗压强度值换算成高径比为 2.0 的标准试件抗压强度值 R_c 。7 种矿岩中, C_1d 的单轴抗压强度最高; 硫化矿和氧化矿的单轴抗压强度相差不多, 强度较高; C_2w 较 C_1b 的强度略高; C_3m 由于含有泥质物, 强度较低。

试验采用电阻片法测定变形参数, 并同时采用纵向引伸计测量弹性模量。在单轴抗压强度试验的同时, 对弹性模量和泊松比进行测试, 如图 2-7 所示。试件的含水状态为室内自然状态。变形试验过程中记录应变的仪器为 DH3817 动静态应变仪。从试验结果来看, C_2w 的弹性模量最大, 泊松比最小; 膏体的弹性模量最小, 泊松比最大; 硫化矿和氧化矿这两种矿岩的弹性模量和泊松比均相差不大。利用引伸计测量所得的弹性模量值与电阻片法的测试结果相吻合。

测定岩石抗拉强度的方法, 有直接拉伸法和间接拉伸法两种。由于直接法的试件制备困难和试验技术复杂, 因而目前多采用间接法(即劈裂法)。劈裂法是在试件直径方向上施加一对线



图 2-7 单轴抗压强度试验

性荷载，使试件沿直径方向破坏，从而间接测定岩石的抗拉强度，如图 2-8 所示。本试验采用劈裂法进行抗拉试验（见图 2-9），属间接拉伸法。通过试验可知， C_2w 的抗拉强度较大，膏体和 C_3m 的抗拉强度较小。总体来看，这几种矿岩的抗拉强度都不大。7 种矿岩抗拉强度从大到小的排列次序是： $C_2w > C_1d > \text{氧化矿} > C_1b > \text{硫化矿} > C_3m > \text{膏体}$ 。

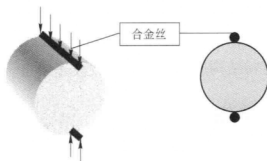


图 2-8 劈裂拉伸试验示意图

原中国建设部为了建立统一的评价岩体工程稳定性的分级方法，为岩体工程建设的勘测、设计、施工和编制定额提供必要的

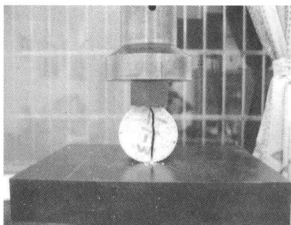


图 2-9 劈裂拉伸试验照片

基本依据,制定了《工程岩体分级标准》(GB 50218—94)。在此标准中,岩体完整程度采用岩体完整性系数来表示,它与岩块声波速度有关。岩块声波速度测试是测定超声波的纵、横波在试件中传播的时间,据此计算岩块声波速度。试验所采用的仪器为中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RSM-SYS 智能声波检测仪。通过试验发现, C_{2w} 、 C_{1b} 和 C_{1d} 三种岩石结构致密、均质,完整性好,纵波波速较大;硫化矿和氧化矿的结构较致密,完整性一般,纵波波速中等; C_{3m} 的均质性较差,完整性较差,纵波波速较小;膏体的材料结构质地不均,纵波波速最小。

2.3 微震事件诱发机理

2.3.1 应力诱发微震事件

8 号矿体应力场是板块边界力与二次应力相结合的复合应力场,二次应力主要是由矿体回采引发的局部岩体应力重分布,容易导致应力集中,主要包括压应力和剪应力。压应力主要是由于

深部开采引发高地应力场形成的。压应力以弹性变形能的形式在岩体中储存,当其超过岩体强度和能量储存极限时,便以弹性波的形式向外释放,形成微震事件;剪应力是由于深部开采岩体受力诱发及活动性构造引起岩体剪切形成的。剪应力引起岩体滑动,并诱发微震事件分布在滑动面上。

2.3.1.1 压应力

研究表明^[59~61]:可以用抗压强度和弹性模量来推测硬岩比软岩储存更多的弹性应变能。如图 2-10 所示,在相同单轴抗压强度及弹性模量条件下,当岩体压缩受力时,脆性岩体和软岩储存近乎相同的弹性应变能,但脆性岩体比软岩存在更为陡峭的卸载曲线。完整脆性或坚硬岩体开挖破坏过程受力引起突然失稳的原因是围岩体刚度(K)比未加载脆性岩体更低,相反,软岩破坏过

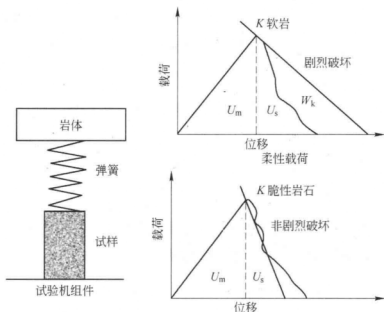


图 2-10 力学测试系统组成及围岩受力
相互作用关系模型 (Hedley)

程不会突然失稳。

图 2-10 是用围岩试样模拟软岩或硬岩岩体加载响应的力学测试系统,在软岩载荷-位移曲线中, U_m 为试样中储存的能量, U_s 是弹簧中储存的能量, W_k 为动能。在该系统中,即使岩体仅包含一种类型岩石,但由于卸载刚度比原围岩体刚度高而可能发生应变型突然失稳。可以看出,软岩卸载刚度要小于脆性岩石卸载刚度,脆性岩体破坏导致岩体与围岩组成的变形力学系统平衡被打破,释放的能量大于所消耗的能量,剩余能量转化为岩块抛出、围岩震动的动能 W_k 。

不论是压破坏产生的微震事件还是不连续结构面滑动产生的微震事件,对于微震事件活动来讲,满足屈服准则的应力状态才是最基本的理论问题。屈服破坏能不能产生微震事件取决于该位置应变能密度和该点岩体破坏时能量蓄积程度。Wawersik 和 Fairhurst^[62]研究证实仅考虑应力不足以描述围岩破坏失稳的力学机制,利用局部应变能密度和能量可以衡量屈服破坏是有微震发生还是无微震发生,岩体的状态是确认岩体破坏的轨迹。他们发现,经过单轴或三轴压缩破坏测试的试样响应模式可以分为两种,一种是破裂为稳定的,反映了试样经历了加载到卸载的过程;另一种是破裂为不稳定的,反映了蓄积在试样中的能量超过了试样自身破坏需要的能量极限值。

随着回采工作面逐步推进,由于应力集中导致蓄积能量超过极限时,岩体容易发生破裂,诱发大量微震事件,从而以地震波或应力波的形式向外传播,如图 2-11 所示。

原岩应力是导致采矿工程围岩变形、破坏的重要因素。由于 8 号矿体采深已超过 1500m,属于深井开采,导致回采区域存在高应力,如表 2-1 和表 2-4 所示。

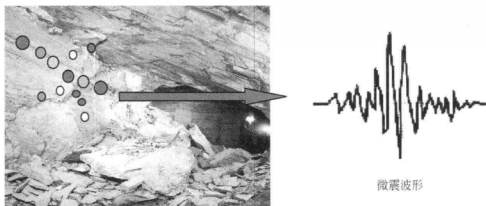


图 2-11 岩体破坏诱发微震事件示意图

表 2-4 8 号矿体原岩应力分布部分测试结果

中 段	1391m			1261m		
应力方向	N20°E	铅直应力	S70°E	N20°E	铅直应力	S70°E
应力/MPa	22.1	21.5	18	26.4	25	22.3

经分析可知, 1391m 中段三个主应力分别是: 最大主应力为水平应力, 方向 N20°E, 沿岩层走向, 大小为 22.1MPa; 中间主应力为铅直应力, 以自重应力为主, 大小为 21.5MPa; 最小主应力为水平应力, 方向 S70°E, 垂直岩层走向, 大小为 18MPa。

1261m 中段三个主应力分别是: 最大主应力为水平应力, 方向 N20°E, 沿岩层走向, 大小为 26.4MPa; 中间主应力为铅直应力, 以自重应力为主, 大小为 25MPa; 最小主应力为水平应力, 方向 S70°E, 垂直岩层走向, 大小为 22.3MPa。

图 2-12 是 1391m 中段一分层 1 号和 3 号矿柱回采过程中, 由于矿体回采引起的 2 号矿房微震事件活动情况。从图 2-12 可知, 微震事件的时空分布特征也反映了岩体内部受力状态, 岩体经矿

柱回采过程后,在2号矿房上盘拐角处和矿房中的活动性小断层内产生应力重分布。由表2-4可知,1391m中段回采已处于高应力状态。在1号和3号矿柱回采过程中,由于矿体回采打破原岩应力平衡状态,引起2号矿房应力集中,当能量蓄积到一定程度,促使2号矿房北西向局部矿体和小断层附近岩体微裂纹萌生、发展、贯通直至失稳,并在该过程中,集聚大量微震事件。

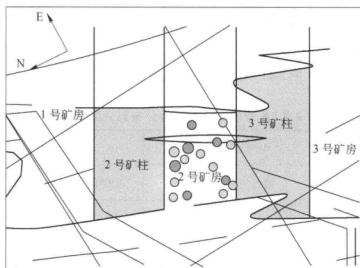


图 2-12 压应力引起微震事件活动

2.3.1.2 拉剪应力

前期国内外大量研究工作主要集中在如何解决微震预测问题上,然而其关键在于确定微震事件是如何发生的,从而可以采取有针对性的措施。Reid 是第一个发展地球物理理论的学者,他在研究了 San Francisco 地震理论后提出了地震弹性回弹理论^[63]。该理论涉及应力和应变逐步积累,并沿断层逐步释放的过程。这也被认为是迄今为止在地壳中构造地震诱发的本质机理。

如图 2-13 所示的一个简单的模型验证了块体沿结构面滑动机理：一个重量为 mg 的块体被加载法向力 N 后静止在光滑平面上，块体被加载一个载荷 F 后沿光滑面运动，力 F 经过一个刚度为 K 的弹簧使块体运动，光滑面和块体之间产生正应力 σ_n 和 τ 。它们之间存在三种关系，分别为式(2-1)、式(2-2)和式(2-3)。当块体与光滑面固定时，满足式(2-1)：

$$u_s \sigma_n - \tau > 0 \quad (2-1)$$

式中 u_s ——静态摩擦系数；

$u_s \sigma_n$ ——剪切强度；

τ ——剪应力。

当力 F 增加到式(2-2)时，便达到了临界值：

$$u_s \sigma_n - \tau = 0 \quad (2-2)$$

当块体在光滑面上开始产生运动时，则满足式(2-3)：

$$u_s \sigma_n - \tau < 0 \quad (2-3)$$

从式(2-2)中可以看出，欲使块体运动，可能的途径有：

(1) 当力 F 逐步增加至式(2-3)时，相应的剪切力 τ 也增加，块体将沿滑动面运动；

(2) 当摩擦系数降低、剪应力 τ 大于 $u_s \sigma_n$ 时，可以使块体发生滑动；

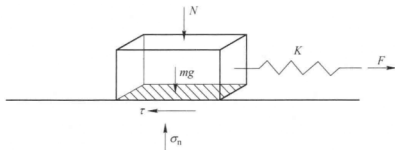


图 2-13 块体沿结构面滑动模型

(3) 正应力 σ_n 降低, 可以诱发块体滑动。

上述模型描述了由于滑块受到剪应力的作用, 达到滑动面极限抗剪强度而发生微震, 也称为黏滑行为。

在现场调查过程中发现, 8 号矿体在回采过程中, 有数量较多的采场及大部分运输巷道的围岩, 由于岩层结构面和组合节理组的切割, 形成了倒三角形 (楔形) 岩块。经采矿工程开挖后, 岩体由原来的三向应力状态转变为两向应力状态, 在地应力影响下, 形成的剪应力容易引起岩块沿结构面滑移, 产生顶板冒落地压灾害, 简称为“倒三角”顶板冒落模式, 如图 2-14 所示。经上述分析, 在顶板冒落过程中, 沿岩块与 C_1d 和 C_1b 滑动面, 由剪应力引起岩块滑动诱发的微震事件沿此滑动面分布。

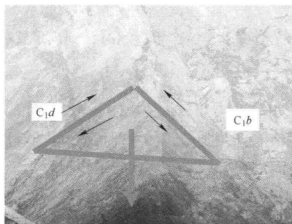


图 2-14 剪应力引起顶板垮冒模型

8 号矿体回采至 1391m、1331m 和 1261m 中段时, 多数巷道由剪应力诱发“肩部”剥离破坏和现场喷射混凝土层破坏, 如图 2-15 所示。微震事件发生在巷道“肩部”破坏过程中。同时, S 波很容易被微震监测系统获取。微震事件可以用泊松过程合理地模拟重现, 足够多的剪应力信息来源于微震事件, 从而可以对岩

爆灾害进行预警，其中重要的研究工作是精确分析由剪应力诱发的微震事件发生的位置、时间和能量。

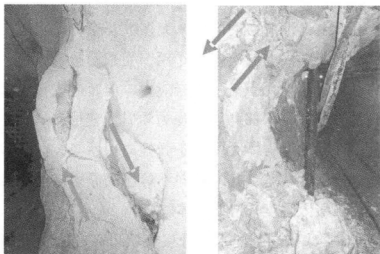


图 2-15 剪应力引起巷道“肩部”剥离

(1261m 中段 64 川口和 1451m 靠近 10 号矿体主运输巷的边帮片落)

2.3.2 采矿诱发微震事件

虽然已经在微震活动预警研究方面投入了大量的精力，但是正确认识微震事件发生机理还是非常困难的。不同的采矿方法可以诱发不同程度的微震活动，但其存在共同的基本力学机理，即应力、变形和能量蓄积达到极限程度时，围岩突然释放就会诱发微震事件。

由采矿引起开挖岩体破坏诱发的微震事件，其能量以微震波的形式向外释放。开挖面应力重分布的直接结果是在开挖面附近发生微震事件，并且发生在应力集中的最大位置。同时，伴随着微震事件最有可能发生岩体裂纹、扩展、贯通，从而导致岩体失稳，这也是能量释放和破坏的位置，其余几种破坏的类型也可以这样理解。Cook^[5]、Salamon^[6]、Ortlepp 和 Stacey^[7]对岩爆的定义

即是采矿引起开挖面岩体破坏诱发以微震事件形式突然释放。如：应变型岩爆、矿柱型岩爆和掌子面岩爆。

采矿扰动主要是指岩体开挖引起强烈的破坏失稳。进入深部开采后，在承受高地应力的同时，大多数开挖岩体因承受巨大的回采空间，引起强烈的二次应力作用，受采动影响，使开挖面的围岩应力数倍、甚至几十倍于原岩应力，从而造成在浅部表现为普通坚硬的岩石，在深部可能表现为软岩大变形、高地压、支护难的特征；浅部的原岩体大多处于弹性应力状态，而进入深部以后则可能处于塑性状态，并有各向不等压的原岩应力引起的压剪应力超过岩石极限强度，造成岩体破坏。

8号矿体回采采用上向水平分层充填采矿方法。图2-16所示为8号矿体1331m中段一分层采矿回采受力的应力场分布示意图。可见，由采场布置和回采顺序判断工作面或围岩二次应力非常困难。随着进一步回采，扰动应力场的分布区域也在增加，导致上盘应力相互作用、刚度变化、矿柱屈服、充填反作用和矿石流动效应等。8号矿体回采应力场分布特征为：

- (1) 最大主应力方向基本平行于矿体走向；
- (2) 在矿体端部或拐点处出现应力集中；
- (3) 二次应力场等值线和矿体边界平行。

由于8号矿体采用上向水平分层膏体充填采矿方法，在回采过程中，导致矿体上部端部和下部采场工作面应力在增加。当工作面接近采空区时，矿体形成高应力区，如果应力接近矿柱的极限抗压强度，那么将在矿柱或附近围压处发生岩体破坏失稳。当矿柱破坏时，岩体刚度的降低导致开挖面上部和下部应力重分布，有时开挖面上部围岩应力全部或大部分转移到矿柱上，如图2-17所示，第一步开挖后，应力转移到工作面采场的围岩体中；

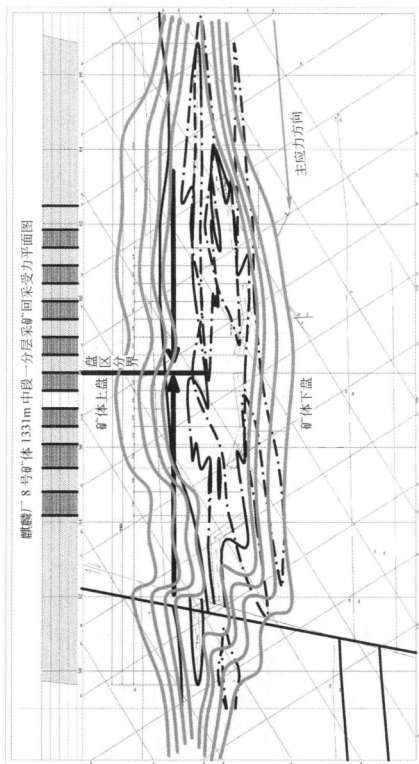
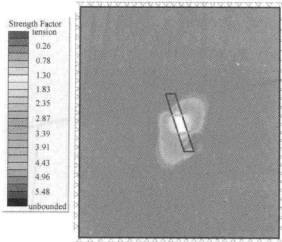
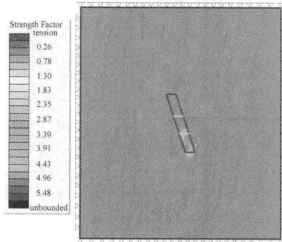
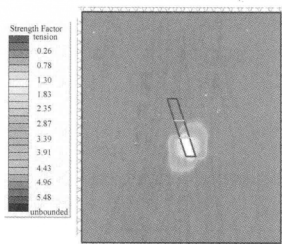


图 2-16 深部开采应力场分布示意图



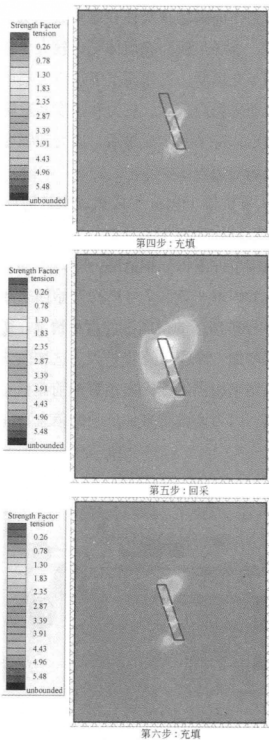


图 2-17 上向水平分层充填法围岩强度系数分布特征

第二步充填后,工作面采场顶底柱强度系数降低、面积缩减;第三步采场回采后,采场顶板和充填体受力较大,强度系数降低区域较广;待第四步充填后,工作面上下盘应力集中及强度系数降低;第五步工作面采场回采后,应力和强度系数降低区主要分布在工作面采场附近;待第六步充填后,应力和强度系数降低区分布在充填体及采场周边岩体中。

图 2-18 是 8 号矿体 1391m 中段微震事件随回采过程变化情况。图 2-18(a) 表示从 2009 年 4 月 14~20 日, 1391m 一盘区 6 号矿房回采过程微震事件累积分布情况, 图 2-18(b) 表示从 2009 年 4 月 21~30 日, 1391m 一盘区 7 号矿房开始回采致使应力集中诱发微震事件及 6 号矿房新的微震事件蓄积情况。微震事件数随回采规模的扩大而增加, 面积也逐步扩大。这种微震事件增加和参数变化特征可以用来提供岩爆灾害预警的前兆信息, 但不能作为岩体失稳的判据。因为该微震事件反映的信息可能是岩体受力加

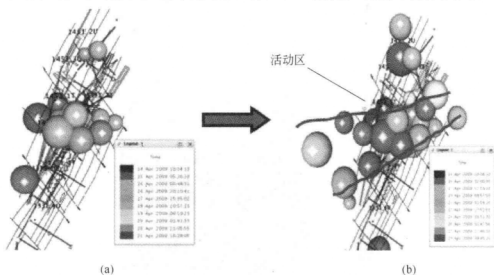


图 2-18 8 号矿体 1391m 中段微震事件随回采过程变化情况

(a) 2009 年 4 月 14~20 日; (b) 2009 年 4 月 21~30 日

载后趋向失稳状态的变形加速过程。此后,若应力重分布和能量释放后重新达到相对稳定,最终便不会引起大规模岩爆灾害发生。所以,微震事件的增加和参数的细微变化不能作为岩体发生岩爆灾害直接判据,但可以对岩体岩爆灾害发生起到警示作用。随着7号矿房回采,图2-18(b)右上侧微震事件数的增加和参数变化,说明岩体正在因承受应力变化而发生状态变化,可以用来对1391m中段一盘区7号矿房围岩状态进行预警,图中显示了微震事件震级和发生时间随回采进行的变化特征,在矿房的回采过程中,由于岩体的开挖诱发了微震事件的聚集,并伴随着高震级微震大事件的产生,说明岩体内部产生了较大状态的变化,但还不能由此判断岩体失稳状态,这时可以用微震事件随时间变化特征来说明岩体内部变化状态。

2.3.3 地质结构面活动诱发微震事件

结构面包含岩体地质结构,如节理、断层和褶皱等,它们的特征表现为与完整岩体的节理、水压等参数相关的强度和刚度。高应力水平是导致岩体塑性变形和大规模破坏的关键因素。如果岩体具有结构完整和包含脆性高抗压强度等特性,则突然失稳破坏的风险就会增加。在这种情况下,岩体在开挖面或沿地质结构面快速移动就会导致微震活动。所以,岩体失稳破坏容易发生在微震事件活动集聚区域。

矿体回采可导致大规模围岩应力重分布,诱发断层局部岩体恢复活性。为数较多的大规模和大震级微震事件的发生一种是由断层滑动引起的,另外一种是由剪切破坏引起的。

断层滑动是用来描述地质结构面受力运动状态的。采矿活动导致断层活动主要有两种因素:一是采矿降低了断层面的正应

力,使沿断层面的剪切强度降低所致;二是采矿增加了沿断层面的剪应力,导致断层面滑动。采矿导致岩体破坏引起能量沿断层面滑动释放,是地质结构面活动的一个重要因素。

8号矿体存在一定的地质不连续结构面,大部分岩体处于高应力集中区,断层沿结构面移动引起应力状态分布不均,导致应力的增加或降低。微震事件是岩体响应变形和破坏的一种表征,是在微震事件的发生过程中,应力和应变不断增加,能量释放以地震波的形式向外辐射,并沿着地质不连续结构面突然释放的过程。微震事件基本出现在地质不连续结构面处,距离工作面有一定的距离,受整个矿区尺度的影响较大。当开采引起的二次应力与构造应力产生相互叠加作用时,会引发大规模结构面滑动,造成较大规模的矿震。图2-19演示了断层滑动诱发微震事件原理。

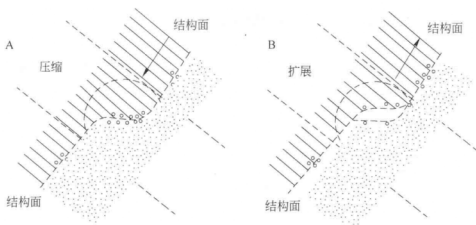


图 2-19 地质不连续结构面活动诱发微震事件

一般来讲,由地质不连续结构面滑动引发的矿震震级较大,因为它与构造应力有关,有时称之为构造型地震。如南非克莱克斯多普金矿被一条大的正断层错断,其错断处发生过一次 5.2 级矿震。经研究^[64],该矿震与此断层的重新滑动有关。当然,并非

所有断层都能被采矿活动激活,断层的运动行为取决于断层的走向、范围和均匀性,以及断层的黏性、摩擦性等。

开拓巷道或回采矿体破坏了原岩应力的平衡状态,形成一个内向压缩的附加应力带。这个内向压缩应力带也就是容积闭合带,可以诱发在巷道或开采面附近的断层活动。如果断层处于底板下部,很可能会因上部卸载(减压)而发生逆断层活动;如果断层处于顶板上部,很可能会因下部卸载(减压)而发生正断层活动;如果断层处于巷道一侧并与其平行,则很可能会因一侧卸载(减压)而引起断层的平推活动。显然,这里是一对双力偶作用。有关断层活动诱发微震事件将在第4章详细分析。

2.4 岩爆灾害前兆信息特征

2.4.1 岩芯饼化现象

地质勘探钻孔岩芯是人们了解岩体力学特征最初的信息来源。所谓岩芯饼化现象,是指在钻进取样过程中因应力释放岩体呈圆饼状破裂的现象。这种现象是岩石脆性和矿区处于高应力状态的明显标志,是钻孔中发生脆性破裂、钻进过程中差异卸荷回弹的产物。岩体的这种破裂主要发生在一定高度的岩芯根部,是由拉张和复合机制导致,主要见于火成岩地区,但在坚硬变质岩及沉积岩中也能见到^[65~67]。该现象早在20世纪60年代就有发现,但直到70年代,人们认识到它是高地应力区所特有的岩体力学现象时,才被引起足够重视。我国二滩电站、鲁布革电站、黄河拉西瓦电站、金川矿区等都有岩芯饼化现象,在会泽铅锌矿8号矿体现场工程地质钻探过程中,在各岩层中也均发现有不同程度的岩芯饼化现象。现场取样统计结果表明,岩芯饼化现象具有

如下特征:

(1) 分布范围广, 但数量较少。在所施工的钻孔中, 大部分沿矿体走向布置的钻孔可见饼化现象, 但饼化数量并不多, 即饼化现象并不严重。一般一个 15m 长的钻孔中分布 2~3 处, 每处岩饼长度 20cm 左右。

(2) 岩饼厚度小。各岩饼厚度不均, 平均厚度 1~2cm, 最薄的仅 0.2~0.3 cm, 一般厚度为 1cm 左右、小于直径的 1/3。

(3) 有一类还未断开成饼状的岩芯, 其上清晰可见细小齿状裂缝构成的环带, 裂缝最大张开度约 0.5mm, 这类岩芯可顺裂缝将其掰成饼状。

(4) 岩饼主要有两种形态: 一种表面凹凸不平; 另一种表面平整光滑。岩饼表面新鲜, 无浸染痕迹。

钻孔饼化岩芯及岩饼形态如图 2-20 所示。

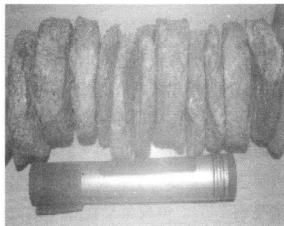


图 2-20 钻孔中的岩芯饼化现象

2.4.2 巷道围岩片状剥落现象

由于 8 号矿体深部开采埋深已超过 1500m, 在 8 号矿体

1391m、1331m 中段，矿体的上盘穿脉和下盘主运输巷还出现了不同程度的围岩片状剥落现象，如图 2-21 所示，具体特征如下：

(1) 巷道边帮剥落，边帮及“肩部”尤为严重，且现象比较普遍；

(2) 矿体上盘巷道比矿体下盘巷道围岩片落现象更严重；

(3) 深部巷道围岩片落比浅部巷道要严重得多；

(4) 片落方向与巷道轴线方向垂直，延伸方向与巷道主轴方向一致，沿巷道方向延伸数米至数十米，呈板状岩片，厚度为 0.5 ~ 20cm，向巷道侧帮延伸约 0.3 ~ 0.8m。

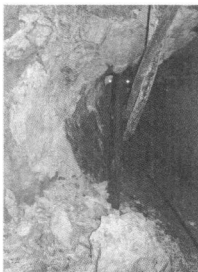


图 2-21 巷道边帮剥落现象

2.4.3 微震事件前兆变化特征

采矿活动破坏了原岩体的应力平衡，采场、围岩和矿体内应力重新分布，形成次生应力场，使得矿柱、采场顶板和围岩发生位移和变形，甚至发生破坏。根据会泽铅锌矿 8 号矿体开采及监

测经验,得出如下3个微震事件前兆特征:

(1) 岩层弹性变形能以声波的形式向外释放——声发射(微震),也称为“岩音”。大强度微震事件是岩层深部离层和断裂,小强度微震事件表明岩层浅部受压破坏。微震事件由深部向浅部和矿柱扩展,事件发生频率由低向高增加,大规模冒落前微震事件数剧增。采场顶板岩层和矿柱承压破坏诱发微震事件,若连续不断,则预示大规模冒落即将来临。

(2) 采场顶板松动和掉块。大规模冒落前2个月内掉块次数为1.5~6次/d;临近大规模冒落前约10余天,增加到5~7次/d;在大规模冒落前夕,剧增至10~15次/d。

(3) 矿柱破坏和采场顶板下沉、开裂、局部冒落。在大规模冒落前一个月,发生裂隙和剥落的矿柱占矿柱总数的12%;在冒落前3个月,顶板下沉速度为0.3~0.5mm/d,并出现采场底鼓、巷道开裂等现象。

2.5 会泽铅锌矿深部围岩失稳特征

根据对会泽铅锌矿8号矿体深部现场工程地质岩组特性及结构面类型的分析,发现其岩体破坏形式主要有5种:

(1) 通过现场调查发现,数量较多的采场及大部分运输巷道,由于组合节理组的切割,形成了倒三角形(楔形)岩块。经采矿工程开挖后,由原来的三向应力状态转变为两向应力状态,在地应力的影响下,其容易沿结构面滑移,产生顶板冒落地质灾害,简称为“倒三角”顶板冒落模式,如图2-22所示。

(2) 通过现场调查及结合数据处理结果发现,在每组岩组中都存在至少一组缓倾斜节理组,倾角近乎水平状,经过其他岩组切割后,形成水平层状矩形块体结构,在上覆岩层来压的作用

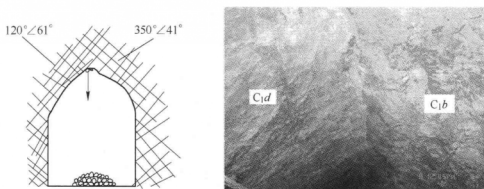


图 2-22 “倒三角”顶板冒落模式

下,岩体容易产生顶板脱层冒落破坏模式,简称为“缓倾斜顶板岩层”冒落模式,如图 2-23 所示。

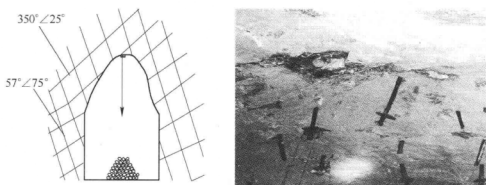


图 2-23 “缓倾斜顶板岩层”冒落模式

(3) 近断层附近的采场受断层的影响,顶板结构破碎,稳定性较差,容易产生顶板冒落和片帮,简称为“单断层”影响顶板冒落模式,如图 2-24 所示。

(4) 现场调查中发现,少数采场受到两条断层的影响,采场处于两条断层的交汇处,矿体及围岩较破碎,对采场顶板及边帮的稳定性影响较大,简称为“双断层”耦合响应的顶板冒落模

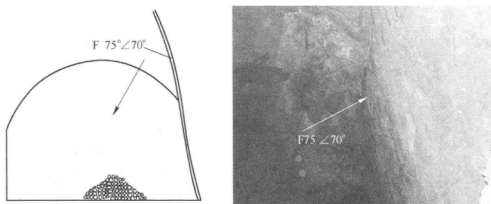


图 2-24 “单断层”影响顶板冒落模式

式，如图 2-25 所示。

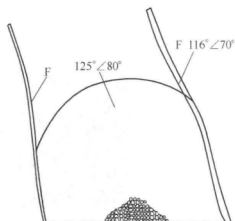


图 2-25 “双断层”耦合响应的顶板冒落模式

(5) 部分采场沿矿体走向布置，在采场的上盘围岩节理不发育，节理组数为一组或两组，产状与矿体产状相同。由于采场的开挖，上盘岩体由三向应力状态变成两向应力状态，上盘围岩处于拉应力状态，呈开裂状态或者沿结构面滑移、剥落，简称为“上盘开裂”地应力响应的顶板冒落模式，如图 2-26 所示。

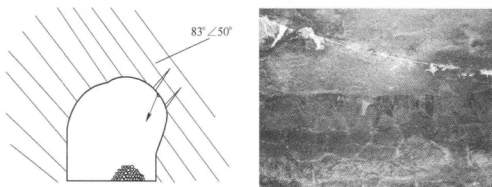


图 2-26 “上盘开裂”地应力响应的顶板冒落模式

2.6 岩爆灾害演化过程

如何确定岩体受力诱发岩爆灾害预警关键点问题成为困扰矿山开采安全的瓶颈。将实验中获得岩体破坏物理力学参数特征值与现场岩爆灾害相结合，是进行深井开采岩爆灾害预警关键点分析的根本途径。矿山岩体受力变形破坏引起岩爆灾害是一个十分复杂的过程，但也遵循着一定的变化规律，如对该规律认识不清，进行矿山开采岩爆灾害预警分析时不考虑矿山具体的工程背景、地质条件和围岩性质，必将导致错误的预警信息。研究矿山岩爆灾害预警关键点问题，是确定岩体破坏过程中应力与应变关系，也就是岩体受力变形失稳的本构关系，以及岩体破坏过程中变形和微震事件变化关系。深井开采岩体变形与破坏的演化过程是围岩体内部的应力与应变相互作用的结果。

矿山在开采前，岩体内部的原岩应力场处于平衡状态。随着矿山逐步回采和采深进一步增加，原岩应力状态被打破，由原来的三向应力状态转变为两向应力状态，引起岩体内部应力场不断变化，并容易在开挖工程岩体端部产生应力重分布而发展成应力

集中区。岩体应力变化促使新的变形发生,当岩体承受应力超过其峰值强度时即会发生岩体失稳破坏。所以,研究矿山岩爆灾害预警的关键在于揭示岩体变形破坏的内在机理、基本力学过程和预警关键点的识别,为此本书又对深井开采岩爆灾害演化过程和预警关键点进行了探索性研究。

2.6.1 岩石受力变形破坏演化过程

岩石试样在受力作用下,产生变形的全过程可以用图 2-27 所示的全应力-应变曲线(亦称为本构关系)表示^[68]。根据图 2-27 所示的全应力-应变曲线,可将岩石变形破坏过程分为以下 4 个阶段:

(1) 微裂纹压密阶段(OA 段)。该阶段试样中原有的张开性微裂纹在受力后逐渐闭合,岩石被压密,形成初期非弹性变形,应力-应变曲线呈上凹型。一般含微裂纹岩石该阶段比较明显,而坚硬岩石或均质度较好岩石不显著,并且正切模量小于弹性模量,即 $E_{OA} < E_{AB}$ 。

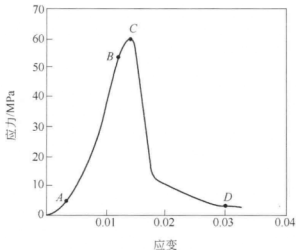


图 2-27 岩石变形全应力-应变曲线(硫化矿 Y2-3 号试样)

(2) 弹性变形稳定发展阶段 (AB 段)。该阶段的应力-应变曲线呈线性, 属弹性变形阶段。弹性模量是表征晶体中原子间结合力强弱的物理量, 故是组织结构不敏感参数。在工程上, 弹性模量则是材料刚度的度量, 是物体变形难易程度的表征。在该阶段, 岩石受力发生的形变会因应力的消失而恢复原状态。

(3) 裂纹扩展微破裂阶段 (BC 段)。 B 点是试样从弹性变为塑性的转折点, 称为屈服点。相应的该点应力称为屈服应力, 其值一般为峰值应力的 80% 左右。进入该阶段后, 破裂不断发展, 直至试样破坏。试样在该阶段由压缩转变为扩容, 轴向应变和体积应变速率变大。 C 点为峰值应力或峰值强度。 E_{BC} 为切线模量, 切线模量就是塑性阶段屈服极限和强度极限之间的曲线斜率, 是应力-应变曲线上应力对应变的一阶导数。其大小与应力水平有关, 并非一定值。切线模量和屈服应力的单位都是 N/m^2 。在该阶段切线模量 $E_{BC} < E_{AB}$ 。

(4) 失稳后阶段 (C 点以后阶段)。岩样在通过峰值应力后, 其内部结构已经发生质的变化, 裂纹迅速扩展导致岩样快速失稳, 一般呈现为块体沿宏观破裂面发生斜剪切破坏形态, 岩样承载力急剧下降, 到达 D 点后, 岩样仍具有一定的承载力, 称为残余强度。

从图 2-28 中可以看出, 由于矿山开采后岩体开挖破坏了原岩应力平衡状态, 岩体受力后, 促使岩体内部微裂纹闭合, 进入压实阶段, 压缩模量 E_{0A} 相对较小。随着开采深度增加和回采进度的加快, 围岩体受力增加, 进入第二阶段 (AB 段), 弹性模量值相对 E_{0A} 增加, 但在该阶段不产生围岩体的破坏。当变形到达 B 点后, 开始进入岩体裂纹扩展贯通阶段, 并逐步向岩体失稳方向发展。所以认为 B 点是岩体受力发生破坏的劣化点, 但不能作为

岩体必然发生失稳的关键点。从 B 点开始岩体受力裂纹扩展加剧,并逐步趋于贯通,此时可能因应力的增加,导致岩体失稳破坏;如果应力没有得到增加,岩体短时间内变形不会增加(但也可能因长期的蠕变作用而引起形变);也就是说可以从 B 点开始掌握岩体变形情况,从而来达到预警的目的。

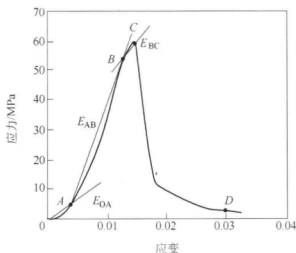


图 2-28 岩石变形特性指标 (硫化矿 Y2-3 号试样)

2.6.2 岩爆类型与岩爆烈度分级

岩爆是深部开采矿山岩爆灾害最常见的表现形式。岩爆类型划分主要是依据岩体弹性应变能的储存与释放特征或应力作用方式来进行的,目前学术界尚未达成共识。岩爆类型和岩爆烈度分级是研究岩爆预测和防治的基本依据,为了掌握 8 号矿体发生岩爆的基本依据,采取有效的和有针对性的岩爆防治措施,根据现场调查的成果,对 8 号矿体的岩爆类型进行如下分级:

- (1) 按破裂程度将其划分为破裂松弛型;
- (2) 按规模将其划分为弱岩爆 (长 0.5 ~ 10m) 和成片岩爆

(长 10 ~ 20m);

(3) 按岩爆岩体破坏方式将其划分为片状剥落型;

(4) 按岩爆岩体高地应力成因和最大主应力 σ_1 方向将其划分为混合应力型。

综合国内外研究现状,岩爆烈度可划分为轻微、中等、强烈、剧烈四级,如表 2-5 所示。

表 2-5 岩爆烈度分级

岩爆烈度 分级	轻微岩爆	中等岩爆	强烈岩爆	剧烈岩爆
主要依据	围岩表层有爆裂脱落、剥离现象,内部有噼啪、撕裂声响;岩爆零星间断发生,对施工影响较小	围岩爆裂脱落、剥离现象较严重,有弹射,可听见清脆的爆裂声,有一定持续时间,影响深度可达 1m 左右;对施工有一定影响	强烈的爆裂弹射,有似机枪子弹射击声,岩爆具有延续性,并向围岩深部发展,影响深度可达 2m 左右;对施工影响较大	剧烈的爆裂弹射甚至抛掷性破坏,有似炮弹巨响声,岩爆具有突发性,并迅速向围岩深部发展,影响深度较大;严重影响甚至摧毁工程

应力法是挪威的 Barton 等人提出的 Q 系统分类中的 α (或 β) 判别法,它是最简单的方法之一,表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= R_c / \sigma_1 \\ \beta &= R_t / \sigma_1 \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

式中 R_c ——岩石单轴抗压强度;

R_t ——单轴抗拉强度;

σ_1 ——最大地应力。

判别方法是:

$$\left. \begin{array}{lll}
 10 < \alpha & \beta > 0.66 & \text{无岩爆} \\
 5 < \alpha \leq 10 & 0.33 < \beta \leq 0.66 & \text{轻微岩爆} \\
 2.5 < \alpha \leq 5 & 0.16 < \beta \leq 0.33 & \text{中等岩爆} \\
 \alpha \leq 2.5 & \beta \leq 0.16 & \text{强烈岩爆}
 \end{array} \right\} (2-5)$$

从表 2-6 可知, 在 1451m 中段的 C_2w 、 C_1b 、 C_1d 地层具有中等岩爆倾向性, 在 C_3m 地层具有强烈岩爆倾向性; 在 1261m 中段的 C_3m 、 C_1b 不同的岩层中, 具有强烈岩爆倾向性。

表 2-6 8 号矿体围岩主要岩石力学参数和岩爆倾向性指标

中 段	指 标	C_3m	C_2w	C_1b	C_1d	备 注
	R_c	20.126	74.677	68.655	104.113	力学参数
	R_t	1.389	6.076	3.071	4.443	
1451m	R_c/σ_1	0.87	3.23	2.97	4.50	取样点 埋深 800m
	R_t/σ_1	0.060	0.263	0.133	0.192	
	岩爆倾向性	强烈岩爆	中等岩爆	中等岩爆	中等岩爆	
1261m	R_c/σ_1	0.76	2.83	2.60	3.94	取样点 埋深 1060m
	R_t/σ_1	0.053	0.230	0.116	0.168	
	岩爆倾向性	强烈岩爆	中等岩爆	强烈岩爆	中等岩爆	

2.6.3 岩爆影响因素及形成机理

岩爆发生的影响因素有: 岩石的脆性、岩石的强度、岩石的含水率、工程埋深、原岩应力、地质构造等。对影响 8 号矿体岩爆发生关键因素的分析如下。

2.6.3.1 岩体结构和岩石性质对岩爆的影响

一般来说, 在一定的水平地应力条件下, 新鲜完整而坚硬致

密的硬岩蓄积的弹性变形能得到突然释放而发生岩爆。一般情况下,在 $R_c > 60\text{MPa}$ 的硬岩中,容易发生岩爆。8号矿体直接顶板为 C_1b 岩层、底板为 C_1d 岩层,上部为灰白色厚层含生物碎屑粗晶白云岩及粉晶-细晶灰岩,具溶孔构造;下部为灰色厚层状砂砾屑灰岩夹细晶白云岩,具藻纹层结构;中部为浅灰色~灰白色中至粗晶白云岩,具藻纹层和溶孔构造,含黄铁矿。其中, C_1d 岩层单轴抗压强度已超过 80MPa ,RQD值均超过70%,属于较完整岩体。在井下工程开挖时,由于高地应力的作用在工程巷道的“肩部”形成剪应力集中而产生岩层剥落。这一规律的发现,可以为高应力区工程岩爆预防与防治提供重要的依据。

2.6.3.2 原岩应力对岩爆的影响因素

在原岩应力的作用下,岩石比较容易蓄积较高的弹性应变能。在高应力条件下,开挖洞室或巷道可使巷道周边岩体应力达到原岩应力的2~3倍。经测试,8号矿体1391m中段、1261m中段原岩应力最大值分别达到22.1MPa和26.4MPa。利用Barton等人提出的应力法, $R_c/\sigma_1 = 2 \sim 2.6$,判断为极高应力区,具有中等至强烈岩爆倾向性。以上结论说明,8号矿体具有中等至强烈岩爆倾向性,在开挖工程过程中一定要注意岩爆的防治。

2.6.3.3 工程埋深对岩爆的影响因素

就岩爆发生的地点而言,一般其都发生在地下深部700m以下,但有时也会发生在较浅或中深部高应力岩层中。欧洲煤矿在地表以下200~400m即有岩爆发生,前苏联的金属矿山岩爆始发深度在180~400m,印度的Kolar金矿在150m深处就发生过岩爆。目前,8号矿体开拓至1261m水平,埋深达1500m,从现有

开拓工程及即将开采深度看, 8 号矿体存在着严重的岩爆倾向性。

2.6.3.4 岩爆形成机理

由于巷道的开挖, 在高应力作用下, 硬脆性的岩石巷道周边会形成应力集中。巷道工程主要是沿矿体走向布置, 因而在巷道周边就会形成平行于洞壁方向的高应力, 使巷道周边岩体处于单轴抗压或低围压状态, 在水平地应力的作用下便会产生巷道“肩部”剥落。在实验室中进行的单轴抗压试验表明, 试样破坏表现为两种类型: 一种是沿试样主轴方向即主应力方向劈裂, 属于张性劈裂; 另一种是沿试样斜剪切破坏。

结 语

本章通过现场调查、室内试验、现场工业试验和分析, 主要得出以下几点结论:

(1) 8 号矿体回采深度达 1500m, 是我国目前开采深度最深的金属矿山之一。结合现场调查及试验, 分析了深井开采微震事件诱发机理:

1) 应力诱发微震事件。8 号矿体埋深大, 高原岩应力导致应力重分布引起应力集中, 容易诱发微震事件。

2) 采矿诱发微震事件。岩体开挖引起强烈的开采扰动, 微震事件数随回采规模的扩大而增加, 且位移面积也逐步扩大, 可以为岩爆灾害预警提供前兆信息。

3) 地质结构面活动诱发微震事件。采矿活动诱发断层活动有两种方式: 一是采矿降低了断层面的正应力, 使沿断层面的剪

切强度降低所致；二是采矿增加了沿断层面的剪应力，导致断层面滑动。采矿导致岩体破坏引起能量沿断层面滑动释放，是地质结构面活动的一个重要因素。

(2) 通过现场工业试验，获得了“岩芯饼化”和巷道“肩部”剥离等岩爆特征，分析了影响岩体稳定性的重要不利结构面因素，总结得出 5 种破坏模式，并详细分析了顶板冒落原因。

(3) 岩石在受力破坏过程中，均会发生微裂纹压密、弹性变形稳定发展、裂纹扩展和失稳 4 个阶段，屈服点 (B 点) 是岩石破坏过程中发生的质变点。

(4) 详细分析了地应力、工程埋深、岩体结构和岩石性质等岩爆影响因素，得出 8 号矿体回采即将从 1451m 中段的中等岩爆阶段进入 1261m 中段的强烈岩爆阶段。讨论了深井硬岩矿山岩爆灾害诱发影响因素，为微震监测系统的构建提供了基础资料，同时为大规模岩爆灾害工程控制提供了参考。



基于模糊物元理论的岩爆倾向性分析

3.1 引言

岩爆倾向性预测是防治岩爆灾害的基础,根据预测结果及时进行岩石工程的反馈设计并采取防治措施,对于深部资源的安全高效回采具有重要的理论意义及实用价值。目前关于岩爆倾向性评判的方法已有很多,如应力法、岩体完整性系数法、强度准则判别法、岩石脆性指数法、弹性能量指数法、动态破坏时间法、岩爆能量比法、冲击能量指数法、冲击倾向准则法、电阻率法等。在这些方法和判定指数中如果仅考虑个别因素,必定会产生片面性和局限性,而面面俱到又会使问题复杂化,且岩土工程中各种因素本身通常只具有相对的准确度,它们与岩爆的关系往往不能以简单的是与否来进行评价。因此,有必要利用数学方法,全面考虑岩爆的影响因素,进而对其倾向性进行综合分析。

3.2 模糊物元理论原理

物元分析方法是我国著名学者蔡文教授于1983年首创的一门介于数学和实验之间的学科^[69]。他通过分析大量实例发现,人们在处理不相容问题时,必须将事物、特征及相应的量值综合在一

起考虑,才能构思出解决不相容问题的方法,更贴切地描述客观事物的变化规律,把解决矛盾问题的过程形式化^[70]。这种方法的主要思想是把事物用“事物、特征、量值”三个要素来描述,并组成有序三元组的基本元,即物元。物元分析是研究物元及其变化规律,并用于解决现实世界中的不相容问题的有效方法。

如果物元中的量值带有模糊性,便构成了模糊不相容问题。模糊物元分析就是把模糊数学和物元分析有机地结合在一起,融化提炼,交叉渗透,对事物特征相应的量值所具有的模糊性和影响事物众多因素间的不相容性加以分析、综合,从而获得解决这类模糊不相容问题的一种新方法。近几年来,这一实用性很强的理论和方法已开始应用于工程技术领域,并取得了可喜的成果。

武斌、韩梅等人^[71,72]将模糊物元应用于水质评价领域,提出基于权重函数和模糊物元分析的方法,以此进行水质的多因素综合评价。

王万军^[73]利用模糊物元对电厂进行效益综合排序评价,通过将模糊物元分析与变异系数法相结合,选取劳动报酬、生产成本、发电标准煤耗率、总产值和发电量等指标建立了综合评价指标体系。

刘志峰等人^[74]提出将模糊物元应用于绿色产品评价领域,采用模糊层次分析法确定权重,并以电冰箱产品为例,建立了多层次评价模型,实现了对电冰箱绿色属性的全面评价。

林杜^[75]将模糊物元方法应用于水泥混凝土路面性能评价,在传统评价指标体系的基础上,利用模糊物元对路面性能进行分类和评价。

张少聪^[76]将模糊物元应用于金融领域,利用评价指标的模糊性和不相容性,以模糊物元为基础,将嫡权法与贴进度相结合,

建立了上市公司的财务失败预测模型。

岩小明等人^[77]针对矿岩稳定性评价的模糊性,从矿山开采的角度选取参数,建立了矿岩稳定性评价的模糊灰元模型,对广东大宝山矿矿压稳定性等级和优劣排序进行了综合分析。

3.2.1 基本概念

任何事物都可以用“事物、特征、量值”这三个要素来加以描述,以便对事物作定性和定量分析与计算。用这些要素组成有序三元组来描述事物的基本元,即称为物元。如果其量值具有模糊性,便形成了“事物、特征、模糊量值”的有序三元组,这种物元被称为模糊物元^[69],记为

$$\text{模糊物元} = \begin{bmatrix} \text{事物} \\ \text{特征} \quad \text{模糊量值} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

用 R 表示模糊物元, M 表示事物, C 表示事物 M 的特征, $\mu(x)$ 表示与事物特征 C 相应的模糊量值,即事物 M 对其特征 C 相应量值 x 的隶属度,于是有

$$R = \begin{bmatrix} M \\ C \quad \mu(x) \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

如果事物 M 用 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 及其相应的量值 $\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_n)$ 来描述,则称为 n 维模糊物元,即

$$R_n = \begin{bmatrix} M \\ C_1 \quad \mu(x_1) \\ C_2 \quad \mu(x_2) \\ \vdots \quad \vdots \\ C_n \quad \mu(x_n) \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

式中 R_n ——表示 n 维模糊物元;

C_1, C_2, \dots, C_n ——表示事物 M 的 n 个特征;

x_i ——表示事物特征 C_i 相应的量值, $i = 1, 2, \dots, n$;

$\mu(x_i)$ ——表示事物特征 C_i 相应量值 x_i 的隶属度, 其值可根据隶属函数确定。

若 m 个事物用其共同的 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 及其相应的模糊量值 $\mu_1(x_{11}), \mu_2(x_{21}), \dots, \mu_m(x_{m1})$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 来描述, 则称其为 m 个事物的 n 维模糊复合物元, 记作

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & \mu_1(x_{11}) & \mu_2(x_{21}) & \cdots & \mu_m(x_{m1}) \\ C_2 & \mu_1(x_{12}) & \mu_2(x_{22}) & \cdots & \mu_m(x_{m2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & \mu_1(x_{1n}) & \mu_2(x_{2n}) & \cdots & \mu_m(x_{mn}) \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

式中 R_{mn} ——表示 m 个事物的 n 维模糊复合物元;

M_j ——表示第 j 个事物, $j = 1, 2, \dots, m$;

$\mu_j(x_{ji})$ ——表示第 j 个事物 M_j 的第 i 个特征 C_i 相应量值 x_{ji} 的隶属度, $j = 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, \dots, n$ 。这里 x_{ji} 的两个下标, 分别表示事物的序号和事物特征的序号, 即物元的维数。

对具体事物来说, 往往给出的是具体的量值, 此时可将式 (3-4) 中的各模糊量值 $\mu_j(x_{ji})$ 用量值 x_{ji} 来表示, 这种物元被称为 m 个事物的 n 维复合物元, 即

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ C_2 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

式中 R_{mn} ——表示 m 个事物的 n 维复合物元；

x_{ji} ——表示第 j 个事物 M_j 的第 i 个特征 C_i 相应的量值；

其余符号意义同前。

3.2.2 关联分析

3.2.2.1 关联变换

关联函数 $K(x)$ 用于刻画可拓集合，隶属度函数 $\mu(x)$ 则是刻画模糊集合；二者所含的元素 x 均属中介元，区别在于关联度函数较隶属度函数多一段有条件可以转化的量值范围。在经典域与节域重合的条件下，关联函数和隶属度函数二者等价，可以互换，只要确定其中任一函数，另一个函数也随之确定。

当确知关联函数中某一特定值 x_{ji} 时，便可以求出其相应的函数值，并称此函数值为关联系数，用 k_{ij} 表示，一般由隶属度函数 $\mu(x_{ji})$ 确定，则有

$$k_{ij} = \mu_{ji} = \mu(x_{ji}) \quad (j = 1, 2, \cdots, m; i = 1, 2, \cdots, n) \quad (3-6)$$

式中 k_{ij} ——表示第 i 个特征的第 j 个比较事物 M_j 与标准事物 M_0 之间的关联系数；

$\mu_{ji}, \mu(x_{ji})$ ——表示第 j 个比较事物 M_j 的第 i 个特征 C_i 相应量值 x_{ji} 的隶属度。

关联系数 k_{ij} 与隶属度 μ_{ji} 可以通过式 (3-6) 互相转换, 这种转换被称为关联变换。由此, 可构造关联系数的复合模糊物元

$$\underset{\sim}{R}_{\varepsilon mn} \circ$$

3.2.2.2 优化原则

优化原则是以单项特征的从优隶属度作为标准来衡量的, 可称为单项特征从优隶属度原则, 简称为优化原则。所谓从优隶属度, 就是各单项特征相应的模糊量值, 从属于标准事物所对应的各特征相应的模糊量值。其包括几种模式, 最常用的模式有两种类型的指标。

越大越优型:

$$\mu_{ji} = \frac{x_{ji} - \min x_{ji}}{\max x_{ji} - \min x_{ji}} \quad (j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-7)$$

越小越优型:

$$\mu_{ji} = \frac{\max x_{ji} - x_{ji}}{\max x_{ji} - \min x_{ji}} \quad (j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-8)$$

式中 μ_{ji} ——表示第 j 个事物第 i 项特征的从优隶属度;

x_{ji} ——表示与第 j 个事物第 i 项特征相应的量值;

$\max x_{ji}, \min x_{ji}$ ——分别表示 x_{ji} 中的最大值和最小值。

3.2.2.3 关联度

关联度是两事物之间关联性大小的度量。若对关联变换求出的关联系数进行加权平均, 则可得到第 j 个比较事物 M_j 与标准事物 M_0 之间的关联度, 用 k_{0j} 表示, 即

$$k_{0j} = w_i * \varepsilon_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3-9)$$

式中 ε_{ji} ——表示第 j 个比较事物 M_j 与标准事物 M_0 之间关联系数向量;

w_i ——表示第 j 个比较事物 M_j 与标准事物 M_0 之间的关联系数权重向量;

*——表示运算符号, 有以下几种模式:

(1) 模式 I, 记作 $M(\cdot, +)$, 表示先乘后加的运算, 则式 (3-9) 变为

$$k_{0j} = \sum_{i=1}^n w_i \varepsilon_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3-10)$$

式中, ε_{ji} 为具有第 i 个特征 C_i 的第 j 个比较事物 M_j 与标准事物 M_0 之间的关联系数, 与其相应的权重用 w_i 表示, 其余符号意义同前。

(2) 模式 II, 记作 $M(\wedge, \vee)$, 表示先取小后取大的运算, 则有

$$k_{0j} = \bigvee_{i=1}^n w_i \wedge \varepsilon_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3-11)$$

式中, \wedge, \vee 为取小、取大运算符号, 其余符号意义同前。

(3) 模式 III, 记作 $M(\cdot, \vee)$, 表示用相乘取代取小, 即先乘后取大运算, 即有

$$k_{0j} = \bigvee_{i=1}^n w_i \cdot \varepsilon_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3-12)$$

式中符号意义同前。

(4) 模式 IV, 记作 $M(\wedge, \oplus)$, 表示先取小后进行有界和运算, 则有

$$k_{0j} = \sum_{i=1}^n \oplus w_i \wedge \varepsilon_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3-13)$$

式中有界和运算为 $a \oplus b = \min(a + b, 1)$, 其他符号意义同前。

(5) 模式 V, 记作 $M(\cdot, \oplus)$, 表示用相乘取代取小, 即先乘

后进行有界和的运算, 则有

$$k_{0j} = \sum_{i=1}^n \oplus w_i \varepsilon_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3-14)$$

式中符号意义同前。

从上述运算模式可以看出, $M(\cdot, +)$, $M(\cdot, \oplus)$ 均为加权平均型, 前者体现了所有因素的共同作用, 从数值上说有综合的含义; 后者则是对各因素依权均衡照顾; $M(\cdot, \vee)$ 和 $M(\cdot, \oplus)$ 均为主因素突出型, 得出的关联度值相差较大; $M(\wedge, \vee)$ 为主因素决定型, 算出的 k_{0j} 值能反映事物的差别。在具体运算时, 可根据问题特点和评价侧重点选用计算模式。最好采用多层次、多模式进行运算, 这样就能利用全部信息, 得出合理结论。通过关联度计算后, 便可构造关联度复合模糊物元 R_k 。

3.2.2.4 评判原则

求得关联度 $k_j (1, 2, \dots, m)$ 之后, 可根据以下几种评判原则确定评估对象的结果。

(1) 最大关联度原则。从各事物的关联度中, 确定其最大值 K^* , 作为评判原则, 称此原则为最大关联度原则, 即

$$K^* = \max(k_{01}, k_{02}, \dots, k_{0m}) \quad (3-15)$$

该原则用途广泛, 既可对模糊物元作识别、聚类、评价和决策, 也可对其价值进行分析, 是模糊物元分析的理论基础之一。

(2) 加权平均原则。把 W_j 作为权重, 将对各事物 M_j 进行加权平均后所得数值作为评判结果, 即

$$D_I = \sum_{j=1}^m W_j M_j / \sum_{j=1}^m k_j \quad (I = 1, 2, \dots, p) \quad (3-16)$$

式中 D_I ——表示第 I 类评价对象的综合评价值;

M_j ——表示第 j 个事物的数值;

W_j ——表示第 j 个事物的关联度值。

如果对各事物的关联度作归一化处理, 则式(3-16)变为

$$D_I = \sum_{j=1}^m W_j M_j \quad (I = 1, 2, \dots, p) \quad (3-17)$$

(3) 模糊分布原则。直接把关联度作为评判结果, 或者把关联度归一化, 再用归一化后的关联度值作为评判结果。归一化的具体步骤如下:

先求各关联度之和, 即

$$K = k_1 + k_2 + \dots + k_m = \sum_{j=1}^m k_j \quad (3-18)$$

再用其和 K 遍除关联度复合模糊物元中的各个关联度, 即得

$$R'_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ k'_j & \frac{k_1}{K} & \frac{k_2}{K} & \dots & \frac{k_m}{K} \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

式中 R'_k ——表示归一化的关联度复合模糊物元;

k'_j ——表示归一化后的第 j 个事物的关联度, $j = 1, 2, \dots, m$, 也即

$$\sum_{j=1}^m k'_j = 1 \quad (3-20)$$

3.2.3 权重的确定方法

权重是用某种数量形式对比、权衡被评价事物总体中诸因素相对重要程度的量值。它既是决策者的主观评价, 又是指标本质物理属性的客观反映, 是主客观综合度量的结果。权重主要取决于两个方面: 一是指标本身在决策中的作用和指标价值的可靠程

度；二是决策者对指标的重视程度。权重的确定有很多种方法，主观赋权法利用评价人员或专家经验确定权重，实施简便易行但也易受主观因素影响，具有很大的随意性，可信度低；客观赋权法利用指标本身所提供的信息确定权重，避免了人为因素的影响，其常用方法有求和归一法和熵值法。

3.2.3.1 求和归一法

求和归一法是先求出各事物每项特征关联系数之和，然后对每项特征的关联系数作归一化处理，便可得出各事物各项特征的权重^[78]。其表达式为

$$R_w = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ w_1 = \frac{\sum_{j=1}^m \xi_{j1}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \xi_{ji}} & w_2 = \frac{\sum_{j=1}^m \xi_{j2}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \xi_{ji}} & \cdots & w_n = \frac{\sum_{j=1}^m \xi_{jn}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \xi_{ji}} \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

式中 R_w ——表示权重复合物元；

w_i ——表示每一事物第 i 项特征的权重值；

$\sum_{j=1}^m \xi_{ji}$ ——表示事物不同特征 C_i 的关联系数之和；

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \xi_{ji}$ ——表示各项特征关联系数之和。

3.2.3.2 熵值法

在信息论中，熵值是系统无序程度或混乱程度的度量，在信息系统中的信息熵是信息无序度的度量，信息熵越大，信息的无序度越高，信息的效用值越小；反之，信息熵越小，信息的无序

度越小,信息的效用值越大。在综合评价中,运用信息熵评价所获系统信息的有序程度及信息的效用值是很自然的,统计物理中的熵值函数形式对于信息系统应是一致的。因此,在 m 个评价对象 n 个评价指标问题中第 i 个评价指标的信息熵值可定义为

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m y_{ji} \ln y_{ji} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-22)$$

式中, $y_{ji} = \mu_{ji} / \sum_{j=1}^m \mu_{ji}$, $k = (\ln m)^{-1}$; $e_i > 0$; 并假定: $\mu_{ji} > 0$ 时, $\mu_{ji} \ln \mu_{ji} = 0$ 。

信息熵 e_i 可用来度量 i 项指标的信息(指标的数据)的效用价值,当完全无序时, $e_i = 1$, 此时, e_i 的信息(也就是 i 指标的数据)对综合评价的效用值为零。因此,某项指标的信息效用价值取决于该指标的信息熵 e_i 与 1 的差值 h_i :

$$h_i = 1 - e_i \quad (3-23)$$

利用熵值法估算各指标的权重,其本质是利用该指标信息的价值系数来计算,其价值系数越高,对评价的重要性就越大(或称对评价结果的贡献越大),于是 i 项指标的权重为

$$w_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} = \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-24)$$

3.3 岩爆倾向性分析

3.3.1 基于模糊物元理论的岩爆倾向性评价的一般步骤

利用模糊物元理论对岩爆倾向性进行综合评价的一般步骤是:

(1) 建立模糊复合物元 \tilde{R}_{mn} 。选取岩爆评价指标,确定分级

评价的划分标准,选择隶属函数,计算各矿岩所属指标量值在相应分级区域里的隶属度,建立矿岩岩爆倾向性评价的模糊复合物元。

(2) 建立关联系数模糊物元 \underline{R}_{emn} 。对模糊物元进行关联变换及从优隶属度处理,建立关联系数复合模糊物元。

(3) 建立关联度复合模糊物元 R_k 。基于优化后的关联系数复合模糊物元,利用权重确定原则得到各项评价指标的权重系数,通过关联度计算,得到关联度模糊物元。

(4) 判定归属。利用最大关联度原则评判矿岩岩爆倾向性等级的归属。

3.3.2 岩爆倾向性评价指标的选取

岩爆倾向性评价指标必须具有实用且容易获得的特性。根据前述会泽铅锌矿岩爆影响因素的研究结果,分别从岩性、岩体结构、原岩应力三方面选取脆性系数 $B = R_c/R_t$ 、冲击倾向能 W_{CF} 、岩石完整性系数 K_v 以及岩石的强度应力比 R_c/σ_1 4 个指标作为评价标准,其中 R_c 为岩石的单轴抗压强度, R_t 为单轴抗拉强度, σ_1 为最大主应力。根据前人在实践中对这些指标的应用情况,将倾向性划分为无岩爆、弱岩爆、中等岩爆、强岩爆 4 个等级,具体分级情况如表 3-1 所示^[79,80]。

表 3-1 岩爆分级情况

评价指标	无岩爆	弱岩爆	中等岩爆	强岩爆
B	10	10 ~ 14	14 ~ 18	18
R_c/σ_1	10	5 ~ 10	2.5 ~ 5	2.5
W_{CF}	1	1 ~ 2	2 ~ 3	3
K_v	0.5	0.5 ~ 0.6	0.6 ~ 0.75	0.75

3.3.3 岩爆倾向性评价隶属函数的确定

确定隶属度的关键是首先确定隶属函数, 针对事物模糊性的不同情况, 可采用不同的方法来确定隶属函数。国内外学者提出了诸如模糊统计法、例证法、专家经验法、模糊分布法等多种方法。前3种方法中隶属函数主要是根据专家的实际经验加上必要的数学处理得到的。而模糊分布法中的隶属函数是根据模糊分布规律得到的, 具有客观性。常见的模糊分布有正态型、 Γ 型、三角型、梯型等。不同的领域、不同的场合可选用不同的模糊分布。根据评价因素的性质, 在岩爆评价指标划分的区间部分选择正态型隶属函数^[81], 边界区间利用“最模糊最清晰”原则构建隶属函数。

3.3.3.1 正态型隶属函数

在区间上选用正态型隶属函数。在模糊分析中, 隶属函数采用正态函数的一般形式为

$$\mu(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2\right] \quad (3-25)$$

式中, $a > 0$, $b > 0$, a 为所属区间的平均值, 如图 3-1 所示。在正态分布中一般认为, 如果给定了 x 的模糊划分区间, 则在区间的中点 $x = a$ 处, $\mu(a) = 1$, 即 a 为所属区间的平均值。

$$\exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2\right] \approx 0.5, b = \frac{x_1 - x_2}{1.665} \quad (3-26)$$

式中 x_1, x_2 ——对应区段相应指标的上、下边界。

3.3.3.2 边界隶属函数的确定

对于无上限(下限)的区间, 即无岩爆及强岩爆的区域划

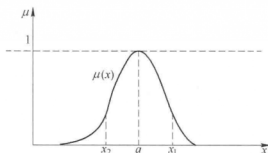


图 3-1 正态型隶属函数

分, 根据最模糊原则和最清晰原则, 即区间的端点处于最模糊状态, 隶属度为 0.5; 区间中点其类别是清晰的, 隶属度为 1^[82], 构建隶属函数分别如下:

(1) “无岩爆” 级别各指标的隶属函数为

岩石脆性系数 B

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 8 \\ \exp\left[-\left(\frac{x-8}{2.4}\right)^2\right] & 8 < x \leq 10 \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-12}{2.4}\right)^2\right] & 10 < x \leq 12 \\ 0 & x > 12 \end{cases} \quad (3-27)$$

岩石强度应力比 R_c/σ_1

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 7.5 \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-7.5}{3.0}\right)^2\right] & 7.5 < x \leq 10 \\ \exp\left[-\left(\frac{x-12.5}{3.0}\right)^2\right] & 10 < x \leq 12.5 \\ 1 & x > 12.5 \end{cases} \quad (3-28)$$

冲击倾向能 W_{CF}

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.5 \\ \exp\left[-\left(\frac{x-0.5}{0.6}\right)^2\right] & 0.5 < x \leq 1 \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-1.5}{0.6}\right)^2\right] & 1 < x \leq 1.5 \\ 0 & x > 1.5 \end{cases} \quad (3-29)$$

岩石完整性系数 K_v

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.45 \\ \exp\left[-\left(\frac{x-0.45}{0.06}\right)^2\right] & 0.45 < x \leq 0.55 \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-0.55}{0.06}\right)^2\right] & 0.5 < x \leq 0.55 \\ 0 & x > 0.55 \end{cases} \quad (3-30)$$

(2) “强岩爆” 级别各指标的隶属函数为

岩石脆性系数 B

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x > 20 \\ \exp\left[-\left(\frac{x-20}{2.4}\right)^2\right] & 18 < x \leq 20 \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-16}{2.4}\right)^2\right] & 16 \leq x \leq 18 \\ 0 & x < 16 \end{cases} \quad (3-31)$$

岩石强度应力比 R_e/σ_1

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 1.25 \\ \exp\left[-\left(\frac{x-1.25}{1.5}\right)^2\right] & 1.25 < x \leq 3.75 \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-5}{1.5}\right)^2\right] & 3.75 < x \leq 5 \\ 0 & x > 5 \end{cases} \quad (3-32)$$

冲击倾向能 W_{CF}

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x > 3.5 \\ \exp\left[-\left(\frac{x-3.5}{0.6}\right)^2\right] & 3 < x \leq 3.5 \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-2.5}{0.6}\right)^2\right] & 2.5 \leq x \leq 3 \\ 0 & x < 2.5 \end{cases} \quad (3-33)$$

岩石完整性系数 K_v

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x > 0.825 \\ \exp\left[-\left(\frac{x-0.825}{0.09}\right)^2\right] & 0.75 < x \leq 0.825 \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-0.675}{0.09}\right)^2\right] & 0.675 \leq x \leq 0.75 \\ 0 & x < 0.675 \end{cases} \quad (3-34)$$

综上所述, 指标评价边界区域的隶属函数如式(3-27)~式

(3-34)所示,中间区域的隶属函数如式(3-25)所示,其 a 、 b 参数的取值如表3-2所示。

表 3-2 各指标关于评价标准的隶属函数

评价指标	无岩爆	弱岩爆		中等岩爆		强岩爆
B	式(3-27)	a	12	a	16	式(3-31)
		b	2.4	b	2.4	
R_c/σ_1	式(3-28)	a	7.5	a	3.75	式(3-32)
		b	3.00	b	1.50	
W_{CF}	式(3-29)	a	1.5	a	2.5	式(3-33)
		b	0.6	b	0.6	
K_V	式(3-30)	a	0.55	a	0.675	式(3-34)
		b	0.06	b	0.09	

3.3.4 岩爆倾向性模糊物元分析

根据会泽铅锌矿工程地质资料及矿岩力学参数测定结果,对各评价指标(脆性系数 B 、岩石强度应力比 R_c/σ_1 、冲击倾向能 W_{CF} 及岩石完整性系数 K_V)进行了计算,结果如表3-3所示。

表 3-3 各评价指标计算值

矿 岩	B	R_c/σ_1	W_{CF}	K_V
硫化矿	28.68	5.043	1.18	0.810
氧化矿	20.83	5.022	2.17	0.827
C_2w	12.29	4.366	2.03	0.664
C_1b	22.36	4.015	0.91	0.833
C_1d	23.43	6.088	0.72	0.784
C_3m	14.49	1.177	1.13	0.711

3.3.4.1 建立岩爆倾向性评价模糊物元

此处将矿岩的指标量值作为特征,将评价标准(如表3-1所示)作为事物, $\mu(x)$ 即为各指标值对于不同评价级别的隶属程度。根据表3-2中的隶属函数,建立各矿岩岩爆倾向性评价的模糊物元 $\tilde{R}_{4 \times 4}$,依次为硫化矿、氧化矿、威灵组 C_2w 、摆佐组 C_1b 、大塘组 C_1d 、马坪组 C_3m ,如表3-4所示。

表3-4 各矿岩岩爆倾向性模糊物元

围岩名称	岩爆倾向性模糊物元
硫化矿	$\tilde{R}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 0.513 & 0.476 & 0.000 \\ W_{CF} & 0.247 & 0.754 & 0.008 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 0.106 & 0.927 \end{bmatrix}$
氧化矿	$\tilde{R}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 0.507 & 0.488 & 0.000 \\ W_{CF} & 0.000 & 0.017 & 0.740 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 0.058 & 0.940 \end{bmatrix}$
威灵组 C_2w	$\tilde{R}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.986 & 0.092 & 0.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 0.337 & 0.845 & 0.133 \\ W_{CF} & 0.000 & 0.459 & 0.542 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.027 & 0.985 & 0.000 \end{bmatrix}$
摆佐组 C_1b	$\tilde{R}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 0.260 & 0.969 & 0.034 \\ W_{CF} & 0.628 & 0.381 & 0.000 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 0.046 & 0.925 \end{bmatrix}$

续表 3-4

围岩名称	岩爆倾向性模糊物元
大塘组 C_1d	$\tilde{R}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 0.800 & 0.189 & 0.000 \\ W_{CF} & 0.697 & 0.186 & 0.000 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 0.231 & 0.693 \end{bmatrix}$
马坪组 C_3m	$\tilde{R}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.342 & 0.674 & 0.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 0.012 & 0.053 & 0.998 \\ W_{CF} & 0.316 & 0.685 & 0.006 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 0.853 & 0.147 \end{bmatrix}$

3.3.4.2 关联变换

对模糊物元进行关联变换及从优隶属度处理。在优化过程中,遵从越大越优原则(见式(3-7)),以此建立岩爆倾向性评价的关联系数模糊物元 $\tilde{R}_{n^4 \times 4}$,如表 3-5 所示。

表 3-5 岩爆倾向性关联系数模糊物元

围岩名称	岩爆倾向性关联系数模糊物元
硫化矿	$\tilde{R}_{n^4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 1.000 & 0.928 & 0.000 \\ W_{CF} & 0.328 & 1.000 & 0.011 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 0.114 & 1.000 \end{bmatrix}$
氧化矿	$\tilde{R}_{n^4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 1.000 & 0.963 & 0.000 \\ W_{CF} & 0.000 & 0.023 & 1.000 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 0.060 & 1.000 \end{bmatrix}$

续表 3-5

围岩名称	岩爆倾向性关联系数模糊物元
威灵组 C_2w	$\underline{R}_{0.4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 1.000 & 0.093 & 0.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 0.399 & 1.000 & 0.157 \\ W_{CF} & 0.000 & 0.847 & 1.000 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.027 & 1.000 & 0.000 \end{bmatrix}$
摆佐组 C_1b	$\underline{R}_{0.4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 0.268 & 1.000 & 0.035 \\ W_{CF} & 1.000 & 0.610 & 0.000 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 0.050 & 1.000 \end{bmatrix}$
大塘组 C_1d	$\underline{R}_{0.4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 1.000 & 0.236 & 0.000 \\ W_{CF} & 1.000 & 0.267 & 0.000 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 0.330 & 1.000 \end{bmatrix}$
马坪组 C_3m	$\underline{R}_{0.4 \times 4} = \begin{bmatrix} & \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ B & 0.000 & 0.507 & 1.000 & 0.000 \\ R_c/\sigma_1 & 0.000 & 0.012 & 0.053 & 1.000 \\ W_{CF} & 0.460 & 1.000 & 0.100 & 0.000 \\ K_V & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.172 \end{bmatrix}$

3.3.4.3 求和归一法确定权重

根据求和归一法确定各矿岩指标的权重,即先求出各事物每项特征的关联系数之和,然后对各项特征的关联系数作归一化处理(见式(3-21)),便可得到各矿岩评价指标间的权重复合物元 R_w ,如表 3-6 所示。

表 3-6 岩爆倾向性权重复合物元

围岩名称	权重复合物元
硫化矿	$R_{w1} = [0.186, 0.358, 0.249, 0.207]$
氧化矿	$R_{w2} = [0.198, 0.389, 0.202, 0.210]$
威灵组 C_2w	$R_{w3} = [0.198, 0.282, 0.334, 0.186]$
摆佐组 C_1b	$R_{w4} = [0.201, 0.263, 0.324, 0.212]$
大塘组 C_1d	$R_{w5} = [0.207, 0.256, 0.262, 0.275]$
马坪组 C_3m	$R_{w6} = [0.284, 0.200, 0.294, 0.221]$

3.3.4.4 关联度模糊物元

将各矿岩的 R_w 和 $R_{s4 \times 4}$ 代入式(3-9), 可得相应的关联度模糊物元 R_k , 如表 3-7 所示。

表 3-7 岩爆倾向性关联度模糊物元

围岩名称	关联度模糊物元
硫化矿	$R_{k1} = \begin{bmatrix} \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ K_j & 0.082 & 0.607 & 0.359 & 0.393 \end{bmatrix}$
氧化矿	$R_{k2} = \begin{bmatrix} \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ K_j & 0.000 & 0.394 & 0.590 & 0.408 \end{bmatrix}$
威灵组 C_2w	$R_{k3} = \begin{bmatrix} \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ K_j & 0.000 & 0.599 & 0.820 & 0.044 \end{bmatrix}$
摆佐组 C_1b	$R_{k4} = \begin{bmatrix} \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ K_j & 0.324 & 0.268 & 0.274 & 0.422 \end{bmatrix}$
大塘组 C_1d	$R_{k5} = \begin{bmatrix} \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ K_j & 0.262 & 0.326 & 0.151 & 0.482 \end{bmatrix}$
马坪组 C_3m	$R_{k6} = \begin{bmatrix} \text{无} & \text{弱} & \text{中等} & \text{强} \\ K_j & 0.131 & 0.438 & 0.535 & 0.238 \end{bmatrix}$

3.3.4.5 判定归属

根据最大关联度原则(见式(3-15))对各矿岩的岩爆倾向性进行判定,结果如表 3-8 所示。

表 3-8 岩爆倾向性级别判定

矿岩类型	最大关联度	倾向性等级
硫化矿 ^a	$K_1^* = K_2 = 0.607$	弱岩爆
氧化矿 ^a	$K_2^* = K_3 = 0.590$	中等岩爆
威灵组 C_2w	$K_3^* = K_3 = 0.820$	中等岩爆
摆佐组 C_1b	$K_4^* = K_4 = 0.422$	强岩爆
大塘组 C_1d	$K_5^* = K_4 = 0.482$	强岩爆
马坪组 C_3m	$K_6^* = K_3 = 0.535$	中等岩爆

3.3.5 岩爆优劣评价

所谓岩爆优劣评价,这里的“优”可理解为岩爆越强越优,评价的方法即是构造各矿岩指标量值从属于“强岩爆”标准的模糊复合物元,通过关联变换及隶属度优化,建立其关联系数模糊物元,最后确定各指标关联系数的权重,计算关联度,按照关联度的大小进行排序。关联度越大,则说明该矿岩的倾向性越接近“强岩爆”的标准。

綜前所述,开展岩爆优劣评价的步骤是:

(1) 评价物元隶属函数确定。同样采用模糊分布的正态型隶属函数,但因为岩石强度应力比 R_c/σ_1 是越小越优(即值越小,岩爆越强烈),故采用降半正态型(见图 3-2(a)),如式(3-35)所示:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ \exp\left[-\left(\frac{x-a_1}{b}\right)^2\right] & x > a_1, b > 0 \end{cases} \quad (3-35)$$

式中, a_1 为标准划分区间里的最小值, 表示当 x 小于此值时, 隶属度为 1; b 仍为 $(a_1 - a_2)/1.665$, a_1 、 a_2 为上下边界。

冲击倾向能 W_{CF} 、完整性系数 K_v 及脆性系数 B 是越大越优, 则采用升半正态型(见图 3-2(b)), 如式(3-36)所示:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2\right] & x > a, b > 0 \end{cases} \quad (3-36)$$

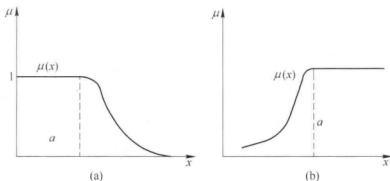


图 3-2 降(升)半正态型隶属函数

(a) 降半正态型; (b) 升半正态型

(2) 评价模糊物元。利用式(3-35)及式(3-36)的隶属函数进行隶属度计算, 求得倾向性评价的模糊物元。式中 $M_i (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 依次代表: 硫化矿、氧化矿、威灵组 C_2w , 摆佐组 C_1b , 大塘组 C_1d , 马坪组 C_3m 。

$$\tilde{R}_{4 \times 6} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 \\ B & 1.000 & 0.994 & 0.203 & 1.000 & 1.000 & 0.631 \\ R_c/\sigma_1 & 0.728 & 0.731 & 0.842 & 0.893 & 0.531 & 1.000 \\ W_{CF} & 0.022 & 0.868 & 0.520 & 0.000 & 0.000 & 0.012 \\ K_V & 0.986 & 0.991 & 0.696 & 0.993 & 0.972 & 0.861 \end{bmatrix}$$

(3) 关联分析。对得到的模糊物元进行关联变换, 并利用式(3-7)的优化原则对其进行优化, 最后得到关联系数复合模糊物元。

$$\tilde{R}_{4 \times 6} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 \\ B & 1.000 & 0.992 & 0.000 & 1.000 & 1.000 & 0.537 \\ R_c/\sigma_1 & 0.420 & 0.426 & 0.663 & 0.772 & 0.000 & 1.000 \\ W_{CF} & 0.025 & 1.000 & 0.599 & 0.000 & 0.000 & 0.014 \\ K_V & 0.987 & 0.993 & 0.000 & 1.000 & 0.929 & 0.556 \end{bmatrix}$$

(4) 权重确定。利用求和归一法(见式(3-21))计算各指标的权重, 得到权重物元 R_w 。

$$R_w = [0.326, 0.238, 0.118, 0.321]$$

(5) 关联度计算。由式(3-9)进行关联度计算, 得到关联度物元。

$$R_k = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 \\ K_j & 0.229 & 0.591 & 0.643 & 0.861 & 0.831 & 0.704 \end{bmatrix}$$

(6) 优劣排序。根据关联度的大小进行倾向性排序, 关联度越小的倾向性越弱, 越大的倾向性越强, 而 $M_4 > M_5 > M_6 >$

$M_3 > M_2 > M_1$, 则岩爆倾向性由大到小依次为: 摆佐组 C_1b 、大塘组 C_1d 、马坪组 C_3m 、威灵组 C_2w 、氧化矿、硫化矿。

结 语

本章利用模糊物元理论, 通过隶属度计算、关联度变换及从优隶属度处理, 建立了岩爆倾向性评价的关联系数模糊物元模型。采用求和归一法确定评价指标权重, 通过关联度计算及最大关联度原则, 对会泽铅锌矿井下矿岩的岩爆倾向性等级及其之间的强弱排序进行了综合评价。结果表明: 8号主采矿体各矿岩具有中等-强的岩爆倾向性, 且其倾向性由大到小依次为: 摆佐组 C_1b 、大塘组 C_1d 、马坪组 C_3m 、威灵组 C_2w 、氧化矿、硫化矿。与单指标评价结果对比, 模糊物元评价模型的结果更为合理, 且方法简便易行, 具有较好的实用价值。

深井开采岩爆灾害震源机制

4.1 引言

通过前面的研究,充分掌握了微震事件诱发机理及岩爆灾害演化机理。但有针对性地提出合理的回采顺序或加固措施,确保回采过程中的人员设备安全,更需要掌握断层或岩体破裂面发震的力学行为。

一些工程开挖可能诱发微震活动。由地面、浅层几百米和深层千米以下的矿山开采所引起的地震活动,统称为采矿诱发地震,简称矿山地震或矿震^[83]。矿山岩爆灾害在全世界深井采矿作业中是最严重和最难解决的问题,随着采矿深度的增加和范围的扩大,这个问题越显突出^[84]。微震监测为地下采空区周围微震事件活动调查和评价提供了有效的手段,可以表述由采矿诱发的微震事件活动。随着数字化记录系统研发的进步,深井开采微震活动实时监测成为现实,并为微震事件强度和震源尺度等震源参数提供了快速计算方法。这极大地扩展了对震源的描述,并将震源特性同某一特定地区的构造条件和采矿条件联系起来。当然,其最终目标是把岩爆灾害的力学行为用微震事件参数来表述。

震源机制是震源区在发震过程的力学表述^[85]。矿山岩爆灾害

是某些经历变形的封闭围岩内能量的突然释放。当该区域发生形变时,在岩体中能量以弹性应变的形式得以储存,一旦应变超过岩体极限,就会发生突然破裂或断裂,破裂面的两侧相对重分布达到一个新的平衡点,并以热、岩石破裂、滑动以及地震波形式释放能量^[86,87]。若矿山岩爆灾害的发生是由断裂作用引起,那么破裂面的方向应与作用在岩体内部破裂面处的应力有关。另外,通过对矿山岩爆灾害发生的微震事件波形分析来确定发震破裂面的方位是有可能的,这就是矿山岩爆灾害震源机制的研究范畴。震级大的矿震是发生在特定的地质背景下,矿区本身存在着发震构造,在区域应力场作用下,受开采活动影响而诱发的一种岩爆灾害。这种岩爆灾害从本质上说是一种构造地震,但其发震背景较一般天然地震更复杂一些。前人对岩爆灾害的类型及其发生机制已进行了一些研究,但是矿山地震类型复杂,目前还没有一种震源机制能够对矿山地震的发生进行圆满的解释。因此,对于深井开采岩爆灾害发生过程的震源机制解,利用微震震源机制解来解析回采过程岩体破坏力学行为,充分掌握岩爆灾害震源机制,将微震事件震源特性同某一特定地区的构造条件和采矿条件联系起来,可以为开采设计、采矿方法选择和岩爆灾害预防措施提供合理的建议,对于矿山安全高效回采有着十分重要的意义。

4.2 震源机制研究现状

4.2.1 震源机制基本理论

震源机制是震源区在发震过程的力学表达,利用这种表达方法可以对大多数地震作出比较合理的解释^[85]。其基本方法是采用断层错动的点源模型,首先汇集各台站记录到的某个地震的资

料,将初至波的质点振动方向和振幅等参数,分别标注在震源参考球的乌尔夫网图上,通过求出两个断层错动构造的点源模型面的走向、倾向及倾角,以及震源附近主压应力、主张应力的方向等参数,求得断层的破裂方向、破裂速度与应力降等参数。但通常所说的震源机制是狭义的,是地震震源处地球介质的运动方式,就研究构造地震的机制而言,构造地震机制是震源处介质的破裂和错动。震源机制研究的内容包括:确定地震断层面的方位和岩体的错动方向,研究震源处岩体的破裂和运动特征,以及这些特征和震源所辐射的地震波之间的关系。研究震源机制,对于由前震报主震,或由主震资料预测强余震的分布,以及由地震资料研究构造带的应力分布状况,都是非常有意义的。

20多年来,地震预测已经成为全球地震学家的主要研究课题,在地震震源机制的研究工作中他们也投入了较大精力。已经取得的较为明确的研究成果是每个地震均不同,而且未发现由几个可供选择的参数来定性的描述地震行为的普遍法则,但也有学者^[88-90]研究发现,较大矿震发生之前,断层上下盘相对形变的积累方向都指向采空区。而震后上下盘的移动方式有所不同,一般是上盘相对上升,并向采空区方向错动,同时井下开采区底板产生大变形,其变化趋势指向采空区。另外随着采区的迁移,地震发生的位置也相应地迁移。由此可见,矿震的发生与开采密切相关,且这些矿震大部分是发生在开采后一段时间。所以,矿山地震的特性是由给定的开采环境和地质环境确定的。

在深井开采过程中,若矿山岩爆灾害是由断裂作用引起的,那么断裂面的方向应与作用在该岩体内部的应力有关,即该应力导致了断裂的发生。矿震引起断层破坏主要有两种变形破坏模式:动力破坏和静态破坏。其中动力破坏变形模式本质是由从震

源破裂产生声波辐射引起。大多数由板块构造运动产生的断层破坏起初是由静态破坏开始,直至 10% 的能量以地震波的形式被驱散^[91]。另外,通过对矿山岩爆灾害发生的微震波记录分析来确定发震断裂面的方向是完全可行的,研究震源机制所采用的方法和技术也是从天然地震学中引用的。迄今为止,尽管在大震级矿山地震和天然地震之间尚未发现有系统本质的差别,但这两类地震之间一些特殊的细微差别显然还是存在的,特别从微震发生机理和观测角度来看更是有着明显的不同。矿震与天然地震相比,一般震源较浅、震级小,但对地面和井下破坏较强烈,因而矿震已成为矿山特别是深井开采矿山面临的一大难题。

矿震一般为单力偶源或双力偶源,但值得注意的是,并非所有的矿震都可由单力偶源、双力偶源或剪切源来解释。有关矿震震源机制的研究表明,除剪切破裂外,矿震还可能其他的破裂形式^[92,93]。另外应该指出的是,有关天然地震震源机制的最新研究表明,除剪切破裂外,其他震源机制也是可能的。其一是一种反常的震源机制,即所谓非双力偶源机制;其二是打破了小震事件换算关系。震源换算关系描述的是震源尺度随地震矩的增加而增长。用初动符号确定震源机制的常规方法存在一定的弊端,即在传感器阵列覆盖面不充分时,存在不能唯一断定震源的情况。有三种方法可以解决台站不足的问题,即复合断层面解、振幅资料的利用和矩张量反演。对点源来说,矩张量反演是最实用、最直接的方法,它仅需要少而精的波形资料就可以对某个事件的震源特性进行求解,并且还可以用来区分双力偶事件和非双力偶事件^[94]。矿山震源机制研究不仅为深井开采设计和安全控制措施提供了参考,而且也给天然地震的研究提供了颇有启发性的启示。

4.2.2 震源机制表示方法

4.2.2.1 波的极性

微震波极性包含任何类型监测的最小信息。尽管如此,在震源机制研究中,P波初动是最容易监测的资料,因为它最容易测定,甚至用低动态范围和低精度单分量地震仪记录都可获得。所以,根据P波初动极性判定断层平面解是最为广泛采用的方法。从P波推导出断层平面解,相当于在震源球上找出将P波初动区分为压缩象限和膨胀象限的两个正交的节平面。在分析P波极性时,地震学家通常把震源机制限制为双力偶。获得双力偶机制归结为要找到两个正交节面(震源球上的大圆),它们把压缩极性和膨胀极性分为4个相等的象限。确定节面的取向需要3个独立量(断层面走向、倾角和滑动角)。节面常用手工方法获得,即将数据画在震源球上用绘图法寻找合适的节面。现在常用计算机让断层面解拟合P波极性分布,多数的系统搜索在解空间中进行^[95]。Backus拟合P波极性的断层面解算法可能是矩张量表示式的最早应用。此算法人为地设定监测极性的正、负振幅,用标准最小二乘法使一个矩张量和这些振幅拟合,然后取矩张量的双力偶分量作为断层面解。

剪切破裂在数学上采用双力偶点源模型。双力偶包含两个相反的力偶,实际计算步骤是:采用两个正交节面,把P波初动(极性)分为4个象限,其中两个是压缩的,两个是膨胀的。两个节面分别对应破裂面和辅助面,由节面的极点 a 和 c ,得到压力轴 P ,张力轴 T 和与之垂直的轴 H ,它们分别接近于最大主应力轴,最小主应力轴和中等应力轴。

这种常规震源机制分析方法的主要困难是震源球上的覆盖不充分, 从而造成节面的不确定性, 为解决资料不足或分布不合理状况, 可采取复合断层面解的方法, 即取一定地区和一定时段的若干震动的 P 波初动资料, 并假定这些震动具有同一震源机制, 从而进行综合处理。

4.2.2.2 震源球极性图

震源机制解 (又称地震机理) 是指震源区微震发生的力学过程。通常采用各种震源模型进行求解, 一般分为点源模型和非点源模型。前者根据点源作用力的不同, 又进一步把点源模型划分为单力偶震源模型和双力偶震源模型; 非点源模型也细分为有限移动震源模型和位错震源模型两种。以上震源模型, 在分析求解后, 提供两组力学参数, 一组为断层面走向、倾向和倾角; 另一组为最大主应力轴、最小主应力轴和中等主应力轴的方位和产状^[96]。该方法广泛应用于双力偶模型, 而对于更普遍的震源机制 (对称矩张量) 也是适合的, 只要所有主矩表示的方法不是同一符号 (同符号是指同一种极性场覆盖整个震源球的表示方法) 即可。Riedesel 和 Jordan 指出的矩张量方法虽然没有这个局限性, 但尚未被广泛应用^[97]。

常用的图解表示微震发生破坏面的几何形状和滑动方向。伍尔夫网球法通常是通过 P 波初动方法来确定, 这通常是最直接的理解, 如图 4-1 所示。然而, 现在美国国家地震信息中心 (NE-IC) 和哈佛大学 CMT 项目用矩张量反演求得震源机制解, 这时用伍尔夫网球表述矩张量是一个比较完美的表述震源机制的方法。

采用震源球的方法极大地简化了震源机制中有关方位角的确定。通过射线到震源的反方向跟踪, 将各传感器位置投影在震源

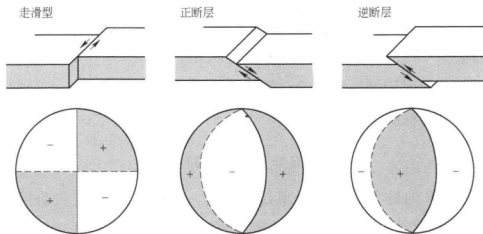


图 4-1 几种简单的断层滑动模型
(走滑型、纯倾滑型 (正断层和逆断层))

球面上,在震源球上各点位置由从垂直方向上测定的震源离源角 i 以及从北向测定的方位角 φ 给出,修定的震源区具有确定的波速。因此,可以查得 i 值,而对短距离的传感器,为了确定 i 就需要确切了解波速对深度变化的结构。对于上下对称的震源机制可以用下半球表示,当在一个微震监测台网微震震源射线向下时,可很方便地采用下半震源球。在地下矿山中,其情况可能有所不同,经常会记录到向上的射线,那么,在上半球的传感器位置就是 $(180^\circ - i, \varphi + 180^\circ)$,这两种情况下 i 角均为从相同的垂直方向上测定的角度。

为了表达震源球,有必要将三维球投影到一个平面上,并且将所观测的数据在震源球上表示为二维图像。P 波初动极性数据采用多种投影方法,最常用的方法有立体平面投影和等面积投影。立体平面投影也叫做伍尔夫网,它保持了角度不变,也就是一种等角度投影,已推广用于构造地质和岩石力学。等面积投影

也叫做施密特网,它与立体平面投影很相像,由于震源球上的面积与投影图上的面积不变,因此,通常把断层平面解作为该投影方法。

在等面积投影中,设在震源球上一点的坐标为 (i, φ) ,它到平面极坐标的变换为^[98]:

$$R = \sqrt{2} \sin(i/2) \quad (4-1)$$

式中, R 的最大值为 1 个单位。因此, 一组 n 个 P 波初动极性(压缩或拉张)观测值可在施密特网上 (R_n, φ_n) 处用适当的符号标示出来, 通常 P 波初动到时及其相应的运动方向是从垂直向地震图上读取, 压缩对应于向上的运动(离源), 通常用符号“C”或“+”来表示, 而拉张对应于向下运动(趋源), 通常用符号“D”或“-”来表示。方位角 φ 由北顺时针计, 以震中为震源点到一给定台站的角度来测定, 也可通过震中与台站的两个相对坐标点计算求得。从震源到给定台站的地震射线的离源角 i , 通常是当 P 波作为速度梯度或反射的结果而非直线时, 由定位程序在定位过程中通过走时的计算来确定。射线路径为一直线, 这是一种最简单的情况, 此时离源角 i 直接通过震源与台站坐标计算得到。步骤如下(见图 4-2):

第一步: 检查触发该区域的每个台站的波形, 记录初至的波形向上(压缩)或向下(膨胀)情况, 从而在施密特网上设置初动点。每个台站的位置和中心相关, 用符号表示初动类型, 用向上(黑色)或向下(白色)表示。选择施密特网下半球。

第二步: 第一节面可以用旋转的首先运动立体网绘制直到发现一个大圆, 该圆分离了实心圆和空心圆。

第三步: 滑动面是两个节面中的一个, 图被旋转并沿 90° 方

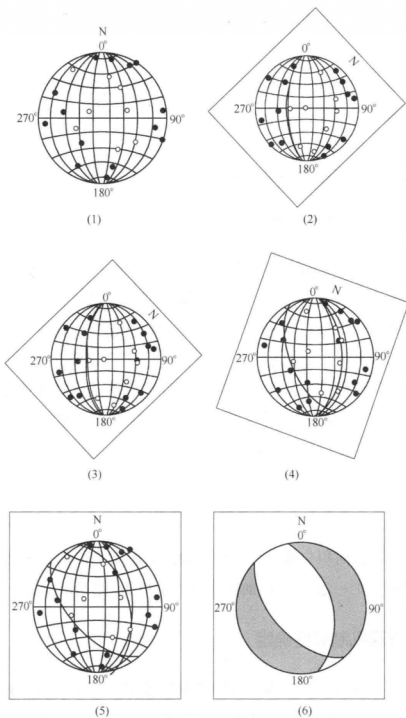


图 4-2 施密特网图解断层平面解

向标记红点, 该点代表着标准平面。

第四步: 再次旋转初动数据直至发现第二个节面, 该节面分离实心圆和空心圆数据。第二节面通过标准节面。

第五步: 旋转第一个运动网格直至 N 标记和施密特网上的 N 标记对齐, 从而读出两个节面的走向方向, 被认为是计算小圆沿着顺时针方向移动。

第六步: 将施密特网图解。

4.2.2.3 震源类型图

图 4-2 中的震源极性图及 Riedesel 和 Jordan^[97] 的震源机制图, 两者都显示出关于震源取向以及震源类型 (主矩的相对值) 等信息。通常双力偶极性图仅仅包含震源取向的信息。但是, 当考虑非双力偶机制时, 其对显示不考虑取向的震源类型是有利的。归一化的主矩有两个独立的自由度, 有许多可能的途径可以用二维数据表示这种信息。图 4-2 表示“源类型”图, 它给出方程式 (4-2) 中的体积变化的量度:

$$k \stackrel{\text{def}}{=} \frac{M^{(V)}}{|M^{(V)}| + |M'_3|} \quad (4-2)$$

假设投影面积与概率成比例, 假设主矩 M_1 和 M_2 以相等概率取 $-|M_1|$ 和 $+|M_3|$ 之间的任意值, 这里 M_3 是最大主矩。

4.3 震源机制解的确定

许多类型的微震活动和监测数据都能用来测定震源机制, 其范围涵盖从监测量的极性 (符号) 的简单测定到振幅及完整时间过程的测定。

4.3.1 双力偶模型基本理论

双力偶是由两个共平面的大小相等但方向相反的单力偶所组成，其力矩与力的方向相互正交。考虑瞬态作用在介质的相邻两个部分上的一对方向相反的力，其合力为零，具有相同的大小，作用方向如图4-3所示。这两个力产生的总位移分别为各个力产生的位移总和^[99]，即：

$$u_i = \varepsilon F_3 \cdot [G_{i3}(\xi + \varepsilon e_2/2) - G_{i3}(\xi - \varepsilon e_2/2)]/\varepsilon \quad (4-3)$$

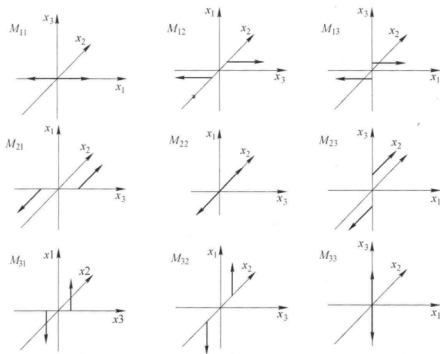


图4-3 M_{ij} 的九种可能组合表达

(注：下标 i, j 分别为力的方向和力臂的方向 (Aki and Richards))

对 u_i 取极限, F_3 趋于无穷, 而 ε 趋于零, 此时乘积 εF_3 保持为有限值, 可得到关系式:

$$u_i = M_{32} \cdot \frac{\partial G_{i3}}{\partial \xi_2} \quad (4-4)$$

式中, $M_{32} = \varepsilon F_3$ 。这对力在经典力学中称为力偶, 而参数 M_{32} 称为该力偶的矩, 它具有力乘以长度的量纲, 且往往是时间的函数。

图 4-3 给出了力与力臂方向的九种可能组合, 它由在 x_i 方向上的力与在 x_j 方向的力臂的力偶矩 M_{ij} 所表达, 图 4-4 为作用于震源的集中力系模式^[100]。

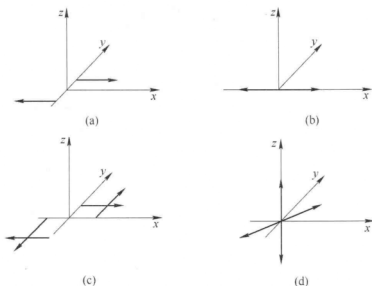


图 4-4 作用于震源的集中力系模式

地震学家曾利用作用于震源处的一些集中力系来解释震源辐射地震波的特征。理论计算证明, 作用于震源的集中力系模式 (c) 和 (d) 的力系辐射的远场地震波是相同的, 而 (a) 和 (b) 的单力偶力系辐射的 P 波, 其振幅和初动方向随方位的分布亦有相同的特点。20 世纪 50 年代前后, 研究学者们曾争论单力偶和双力偶哪一种能真实地反映震源发生过程, 后来很多深入研究的结果否定了单力偶模型而接受了双力偶模型。这主要是因为

尽管二者 P 波的辐射图像一样，但二者 S 波的辐射图像却不同，而 S 波的观测结果支持双力偶模型。

双力偶震源的表述有两种最常用的方法，第一种是从位于滑动面上的一个纯滑动或剪切位错所产生的微震辐射的节平面的角度来描述；而第二种则是通过对称矩张量的六个相互独立的向量来表述震源。

双力偶地震机制分为 3 种：（1）各向同性介质中垂直走滑剪切断层平面，示出滑动方向和等效双力偶力系的分布，力作用点为作用力与坐标轴的交点。（2）压缩波辐射图形，示出断层面（实线）和辅助面（虚线）。（3）剪切波辐射图形。这些辐射图形相对其最大值作了归一化。

若以到原点的距离长短来表示震源球面上地震波振幅的强弱，则可构成地震波的辐射玫瑰花图。图 4-5 给出单力偶和双力偶在相应于震源的集中力系模式中的面内（作用力矢量所在平面）P 波辐射花样图。

根据地震波观测按双力偶点源模式求解震源的基本参数时，

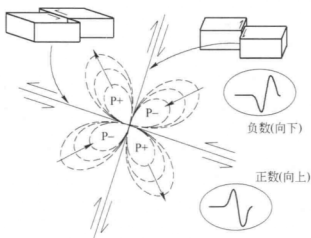


图 4-5 沿着滑动面的震源 P 波极化

除了给出两节面（或其法线矢量）的空间产状外，还常给出 P 、 B 、 T 轴的空间方位。 B 轴即是两节面的交线，又称零轴，因为该轴线上质点位移为零，也可记为 N 轴。 P 轴和 T 轴都位于同 B 轴垂直的平面内，且各自分别与两节面的夹角相等， P 轴位于压缩波象限，而 T 轴位于膨胀波象限，如图 4-5 和图 4-6 所示。 P 轴和 T 轴可分别看成是同双力偶等效的双偶极力系的压力轴和张力轴。

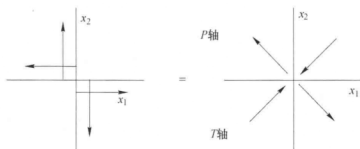


图 4-6 双力偶主轴描述

观测符号在震源球面上的分布、节面或各力轴与震源球面的交线或交点等常常用图表示出来。由于不容易直接在球面上作图，故需用平面作图来代替，于是出现了多种将球面上的点同平面上的点一一对应起来的投影方法。最常用的是伍尔夫网和施密特网，二者所取的投影平面都是某个过球心的大圆面。伍尔夫网又叫等角投影网或赤平极射投影网，球面上的正交曲线族投影到平面上后仍保持正交。施密特网又叫等面积投影网，球面上面积相等的区域在平面上投影后仍相等。

滑动面的方位通常采用地理坐标系来表示， x_1 轴指向北 (N)， x_2 轴指向东 (E)，而 x_3 轴向上。在该坐标系中，滑动面方位只用两个角度来定义，而第三个角度通常用于说明滑动的方

向。滑动平面与地球表面的截线称为滑动面的走向,用角度表示其方位称之为走向角,即滑动面的走向或走向方位角,用 φ_s 表示,表示是向下沿顺时针由北转至走向方向的角度($0 \leq \varphi_s \leq 2\pi$)。而对走向方向的确定,即当朝着走向方向看时,滑动面倾向是向着右边倾斜的。在地球表面与走向正交的截线,正是滑动面的倾斜方向,称为倾向。向下滑动面正交于走向的线,即为滑动面的倾向,滑动面的倾斜方向与滑动面的倾向夹角 δ 称之为倾角,为水平向下的倾斜角度($0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}$)。第三个角度 λ 叫作仰角或滑动角,它是走向与滑动矢量间的夹角,也是“上盘”相对“下盘”的方向。仰角在滑动面内的测定,沿水平走向逆时针方向为正,实际常采用 $-\pi \leq \lambda \leq \pi$ (有时也采用 $0 \leq \lambda \leq 2\pi$)。可以看出,所采用的仰角变化,当 $-\pi \leq \lambda \leq 0$ 时对应于沿垂直轴 P 轴的膨胀,而 $0 \leq \lambda \leq \pi$ 时,则为压缩。

利用双力偶点源震源模型理论求解震源机制解,研究构造应力场和采矿诱发岩爆灾害,是目前研究天然地震和矿震广泛采用的方法,虽然震源无法近距离观测,但人们却渴望对其进行近距离观察,以验证该模型的可靠性^[101]。相对而言,采矿扰动诱发岩爆灾害形成的震源有近场观测的可能,为探求岩爆灾害孕育力学行为和达到预警的目的,研究其震源机制也成了人们一直关注的重要内容。双力偶模型通常有两个不同断层面但符号相同的地震观测方式,它们被叫做真断层面和辅助断层面。为了判定断层面是真断层面还是辅助断层面,有必要了解余震定位和表面破裂调查等附加信息。

利用双力偶点源的震源模型能够较客观地反映应力场、地震应力和能量释放状态;极近场观测到的震源情况也有助于对矿山

岩爆灾害震源机制作出比较客观的解释。而在采矿环境中,重点分析的则应是它的近场和中间场的震源机制解和辐射花样。在大多数情况下,矿山岩爆灾害是由剪切破裂和区域断层平面滑动所产生,也就是说作用力在一个面上。会泽铅锌矿8号矿体深部开采形成的岩爆灾害与天然地震有着本质的区别,而且震源机制本身也存在很大的差异性。在深部开采及高应力条件下,岩爆灾害孕育的主要应力来源是卸荷产生的次生应力场,这种次生应力场受构造应力场和重力应力场的共同作用,其中卸荷应力场的诱发作用更重要,表现更突出。矿山震源机制的研究为判断开采区域应力场变化、岩体滑动方向和矿山岩爆灾害预警提供了有益的途径。

4.3.2 求解震源机制解实例

由于8号矿体地质赋存条件复杂、开采深度大、高地应力集中,容易在开采区域附近岩体产生脆性断裂。因此,在8号矿体回采过程中存在开采扰动诱发岩爆灾害的危险。由于1451m中段以上回采基本结束,正在进行1331m和1391m两个中段同时向上回采。所以,回采的重点范围是8号矿体的1331~1451m。2007年8~12月采场发生垮冒情况记录如表4-1所示。

表4-1 8号矿体部分采场垮冒记录

事件	时 间	位 置	垮冒量/t	坐标 (x、y、z)
1	2007-08-09 夜班	1511 中段3号盘区5号矿房	200	(9610、6126、1575)
2	2007-09-06 夜班	1499 分段3号盘区3号矿房	400	(9600、6150、1499)
3	2007-09-12 夜班	1487 分段2号盘区9号矿房	100	(9650、6160、1496)

续表 4-1

事件	时 间	位 置	垮冒 量/t	坐标 (x 、 y 、 z)
4	2007-10-10 夜班	1565 分段 2 号盘区进路	150	(9715、6110、1575)
5	2007-10-17 夜班	1451 中段 3 号盘区下盘南端沿脉	150	(9590、6130、1499)
6	2007-11-20 夜班	1499 分段 15 分层 3 号盘区	100	(9610、6130、1499)
7	2007-12-07 夜班	1499 中段 15 分层 7 号矿房	150	(9640、6140、1499)
8	2007-12-13 白天	1499 分段 1 号盘区 3 号矿房	100	(9620、6200、1499)

注：坐标点的 x 坐标省略了前三位数字， y 坐标省略了前两位数字。

8 号矿体位于云南省东北部，矿床位于扬子准地台西南缘，滇黔褶断区西部，滇东北褶断束南东部东川—镇雄构造带中的会泽金牛厂—矿山厂成矿带上。区域构造环境复杂，矿区构造以发育北东—南西向褶皱与断层组成的背斜为特征。北东—南西向的断层是矿床重要的控矿构造，矿山厂、麒麟厂、银厂坡断层组成三重叠瓦状构造，断层具有多期活动的特点，与成矿关系密切。麒麟厂区域构造发育有北西向断裂、麒麟厂逆断层，区内需要监测的 8 号矿体赋存于下石炭统摆佐组上部粗晶白云岩中，矿体顶、底板与围岩界限清楚，沿层产出。矿体产状与地层一致，走向 $N20^{\circ} \sim 40^{\circ}E$ ；倾向 SE；倾角 $61^{\circ} \sim 63^{\circ}$ ，开采深度达 1500m，矿体上、下盘均为中粗晶白云岩夹灰岩。该区域发育较多构造、断层。表 4-1 所示地压灾害均发生在特定的地质背景下，是矿区本身存在着发震构造和人为扰动影响因素，在区域应力场作用下，同时受开采活动影响而引发的诱发岩爆灾害。这种岩爆灾害从本质上说是一种构造地震，但其发展背景、孕育过程较一般天然地震要复杂得多。

以 8 号矿体采场冒顶事件 1、3、6 为例，图 4-7 分别给出了

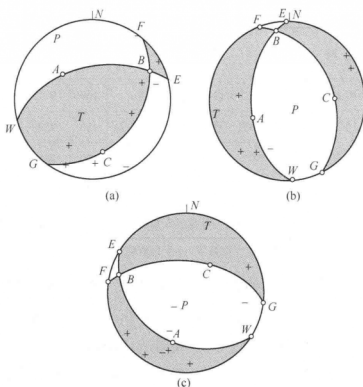


图 4-7 深井开采岩爆灾害震源机制图解

(a) 事件 1 (2007-08-09); (b) 事件 2 (2007-09-12);

(c) 事件 3 (2007-11-20)

这 3 次岩爆灾害的破裂面断层平面解。从图 4-7(a) 可以看出, 事件 1 中 (2007 年 8 月 9 日), 弧 \widehat{FBCG} 表示一个节面的投影, 其走向为 39° , 倾向 SE, 倾角 40° ($N40^\circ E$), 该节面的极在 A 点, 从最大圆弧 \widehat{FBCG} 到该点为 90° 。第二个节面与第一个节面正交, 且所表示的最大圆弧一定通过 A 点, 如图 4-7(a) 所示, 用弧 \widehat{WABE} 表示, 其走向为 257° , 倾角为 57° , 第二个节面的极在 C 点, 它从弧 \widehat{WABE} 计起为 90° , 并位于圆弧 \widehat{FBCG} 上。两个节面的交点在 B 点, B 轴是零轴。垂直于零轴的面由包含四个轴的 PATC 表示。

这就是垂直于两个节面的 A 轴和 C 轴, 还有 P 轴和 T 轴。它们是压缩和张拉轴。 P 轴离 A 轴和 C 轴 45° , 并处于张拉象限内。

如表 4-2 中事件 1 所示, P 轴由走向 150° , 仰角 9° 确定, T 轴由走向 36° 、仰角 69° 确定。通常假定 P 轴表示最大压应力的方向, 而 T 轴对应于最大拉应力的方向。若第一个节面 $FBCG$ 为滑动面, 那么 C 点 (正交于辅助面的轴) 便是滑动矢量, 其倾角为 59° , 若第二个节平面 $WABE$ 是滑动面, 则 A 点是滑动矢量, 其倾角为 113° 。由于这两个圆弧没有把经常出现的压缩象限和膨胀象限完全分开, 因而识别的质量依据在于实际触发传感器的数目和分布、用于射线跟踪的速度模型和微震事件记录的正确极性。通常假定滑动矢量平行于断层面上所解得的剪切应力。 P 轴和 T 轴并非严格对应于引起微震的应力, 在不均匀连续介质中主应力方向与断层平面解的关系是相当复杂的。采用 P 轴和 T 轴而不采用节平面描述层面解, 存在一些优点。 P 轴和 T 轴可明确通过非断层面引起的张拉区和压缩区的象限分区来确定。这表明波振幅最大值的方向, 即使只有若干个观测点, 仍可以通过选择对应于 T 轴的压缩平均方位和 P 轴的张拉平均方位, 给出近似方位。

微震事件的发生往往受控于较大范围的构造应力场和人为开挖扰动诱发的次生应力场。如图 4-8 所示的事件 1, 震源定位坐标位于⑧号小矿体与 C_1b 的岩层分界线处, 该分界线走向为 27° , 倾角为 60° 。根据震源机制图解和震源机制解综合分析可知, 主压应力方向为 130° , 沿矿体倾向方向 (117°)。结合前期的原岩应力测试表明, 最大主应力方向多为 129° , 应力值为 22MPa , 并以水平挤压为主。这一应力方向与成矿构造方向一致。如图 4-7 和图 4-8 中节面 A , 也就是 $FBCG$ 节面, 从事件 1 (2007 年 8 月 9 日)

表 4-2 深井开采岩爆灾害震源机制解

事件	时 间	节面 A				节面 B				P 轴		T 轴		N 轴		初动 个数
		走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	RMS	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	RMS	方位角 /(°)	仰角 /(°)	方位角 /(°)	仰角 /(°)	方位角 /(°)	仰角 /(°)	
1	2007-08-09	39	40	59	2	257	57	113	7	150	9	36	69	244	19	11
2	2007-09-06	139	48	-175	2	46	87	-42	2	173	31	280	26	222	-48	8
3	2007-09-12	340	41	-104	35	179	50	-78	26	326	80	80	4	351	-10	12
4	2007-10-10	242	48	108	56	37	45	71	41	320	-2	42	77	55	-13	6
5	2007-10-17	194	34	142	36	316	70	62	53	247	20	9	56	327	-26	9
6	2007-11-20	123	36	-69	23	278	56	-105	22	327	74	198	10	106	12	10
7	2007-12-07	76	35	170	33	174	84	55	31	112	31	232	40	178	-35	8
8	2007-12-13	19	50	-31	23	130	67	-136	51	171	47	71	10	332	41	6

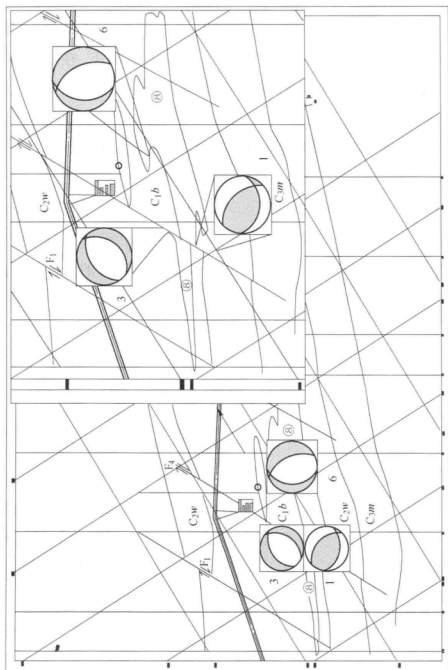


图 4-8 部分深井开采岩爆灾害震源机制解定位分布图

震源机制解可以说明该事件是由于人为回采扰动影响,引起不同岩层间沿分界线滑动而诱发的岩爆灾害事故。事件3(2007年9月12日)的震源机制解表明,节面A(FBCG)震源机制解的走向方向为 340° 。该节面与断层 F_4 在一个平面上,走向为 333° 。从获得的微震事件震源机制解中可以判断出震源断错满足以走滑正断层为主、倾滑正断层为辅的震源位错机理,发生的断错方向与断层构造发育方向一致。通过对该震源机制解分析认为,该断层处于不稳定状态,受区域构造应力场的影响,断层产生的是SE向主压应力,属于走滑型正断层。 P 轴倾角呈水平状,显示出震源区内存在较为显著的NW向的水平挤压作用,其中EW向的张拉应力起重要作用。

结 语

基于本章分析推导,得出如下结论:

(1) 通过阐述震源机制的表示方法,主要利用震源球的极性进行图解,建立震源模型,在分析求解后,提供两组力学参数,一组为断层面走向、倾向和倾角;另一组为最大主应力轴、最小主应力轴和中等主应力轴的方位和产状。

(2) 利用双力偶模型,对8号矿体2007年下半年的8次采场垮冒事件进行求解,得出了震源的节面A、节面B、 P 轴、 T 轴和 N 轴,获得了震源机制解。

(3) 根据微震监测事件参数,对8次震源事件进行定

位, 得出微震事件震源均处于活动断层或岩层分界线, 掌握了断层活动的运动规律, 其中微震事件 1 和 3 的震源事件处于活动断层 F_4 , 而微震事件 6 的震源事件处于⑧号小矿体与 C_1b 的岩层分界线上, 说明人工开挖使岩层分界线诱发微震事件活跃。



深井开采岩爆灾害微震监测预测预警研究

5.1 引言

采场的岩爆灾害预警可分为单采场预警和大范围采场预警两种情况。由于我国金属矿山生产相对落后,工作场地繁多,故不适于便携式仪器进入采场进行逐一单采场监测预警。另外,单采场监测结果亦不能反映大范围灾害的趋势。大范围采区和连续回采形成采区的灾害监测与预警一般应用多通道仪器作定位处理,进行岩爆灾害预警^[102~105]。

采场冒顶、采空区崩塌和岩爆等岩爆灾害涉及诸多复杂因素的岩体力学行为过程,很难用传统的岩石力学理论来解释。人们企图应用岩体微震监测技术,寻求冒顶规律与微震监测之间的相互关系,抓住冒顶的前兆特征进行预警。长期以来,尽管已经获得了许多前兆特征,然而研究表明:前兆异常不总是预示岩爆灾害的来临,这使得该技术得不到推广。解决此问题的关键在于,与传统的岩石力学方法相比,其预警体系必须在观念和理论上有一个根本的革新,才能推动微震监测技术的进一步发展。

20世纪70年代以来,非确定性理论如突变理论、协同论、耗散理论、分形结构论和人工神经网络系统的出现,极大地促进

了岩体力学的发展。用这些理论研究岩体失稳过程,不仅正确地描述了其非线性动力特征,消除了确定性和随机性两套理论间的鸿沟,而且进一步开拓了岩体失稳预警的新概念、新理论和新方法。

本章基于上述非确定性理论,建立了岩体破坏过程微震监测预警矿山岩体力学灾害的示范模式。其中包括:岩体微震监测参数的确定、预警的模型及相应的监测方法。实践表明,这种预警方法的应用达到了预期效果,也为这项技术的发展开拓了新途径。

5.2 微震监测系统构建

矿山岩爆灾害包括矿山开采过程中诱发的岩爆、矿震、高速滑坡、冒落、突水和瓦斯突出等灾害问题,是矿山开采过程中因应力场扰动诱发微破裂萌生、发展、贯通、断裂等岩石破坏失稳的结果。由于深部开采岩体力学行为的复杂性,在开采工程实施前,深部岩体力学行为的实际情况无法用理论计算和分析来表征,同时,理论计算本身也无法实时反映岩体工程条件的动态变化。因此,在深部开采岩爆灾害具有严重倾向性的矿山中进行工程开挖时,实施现场监测是掌握和评价工程岩体活动状态的真实可靠有效的技术措施。由于人们对发生岩爆灾害机理的认识不够充分,理论计算更加难以准确反映实际情况。对于矿山岩爆灾害的监测预警而言,微震监测技术已经成为深部开采矿山诱发岩爆灾害监测的主要技术手段。利用微震监测系统,在发生微震活动的区域岩体内布设传感器,探测震源所发出的地震波,确定发生震源的位置及地震活动的强弱和频率。基于微震监测获得微破裂分布位置,判断潜在的矿山岩爆灾害活动规律,并实现矿山岩爆

灾害预警。微震监测（声发射监测）是目前国外广泛应用于深井矿山安全开采的监测技术手段，能够为深井开采矿山安全生产提供有力的保障。

5.2.1 微震监测系统设计

5.2.1.1 主要影响因素

由于地下采矿工程的特殊性，以及工程施工的影响，对微震监测系统的优化设计不能仅仅依靠理论分析。在现场，首先根据采矿工程的开拓采准工程布置，初步选择基本的监测范围，然后在此监测范围内，合理布置传感器，对传感器的位置进行优化分析，确保目标监测范围内的监测技术指标（如空间定位精度）满足要求，并使监测范围达到最大值。为使微震监测系统的监测效果达到最优，须对微震监测系统进行优化设计。

一般来说，建立一套微震监测系统必须考虑以下几方面的因素：

- （1）监测对象；
- （2）监测范围；
- （3）监测对象的客观环境背景；
- （4）监测应达到的目标；
- （5）对监测系统的投资；
- （6）定位精度要求。

为达到优化方案目的，在进行多个方案设计后，需充分考虑上述影响因素，进行方案优化，最终得出最佳优化设计方案。

5.2.1.2 微震监测系统基本组成

本监测系统由地表监测站、井下数据交换中心（EQ）、信号

采集传感器（QS）和传感器四大部分组成。地表监测站设在坑口办公大楼内；井下数据交换中心布置在 1331m 中段竖井口马头门硐室内；传感器阵列布置在监测区的围岩岩体内。由于井下环境条件的限制，井下数据交换中心的布置应考虑：

- （1）选择较为安静的地点，远离采矿作业区；
- （2）应尽量靠近传感器，以减小通信电缆的总长度；
- （3）建在较为稳固的岩层中，以确保数据交换中心的安全；
- （4）应便于利用井下电源，方便与地表监测站的通信；
- （5）考虑井下通风、防潮等环境问题；
- （6）应便于通信电缆、光缆的敷设。

本微震监测系统分为地表和地下两大部分，地表和地下部分均系长期监测服务设施，系统的基本组成如图 5-1 所示。井下数据交换中心设在 1331m 中段的 2 号竖井信号硐室，通过光缆传至

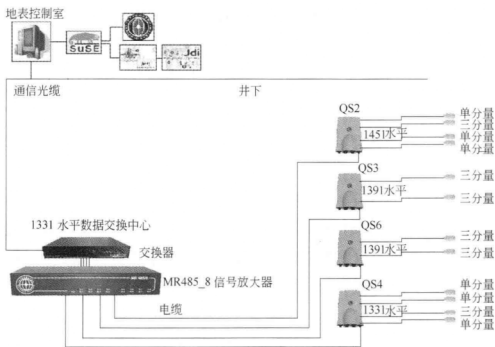


图 5-1 会泽铅锌矿微震监测系统基本组成

地表监测站内,传感器与井下数据交换器之间用信号电缆通信。

5.2.1.3 传感器布置方案设计

关于微震监测系统的安装,初步考虑方案为:考虑到矿体的赋存条件、采矿方法及现有工程布置,为达到监测目的和要求,本着在满足有效监测距离内 QS 系统的传感器布置尽量分散,使监测网络覆盖 1451~1331m 的 8 号矿体,预定在 1451m 中段布置一套 QS 系统、1391m 中段布置两套 QS 系统、1331m 中段布置一套 QS 系统,各套 QS 系统负责各自所属的区域,这样可使每个中段的 QS 系统监测精度达到最优效果。

传感器布置位置的适用性,是整个系统优化设计的核心。在上述初步设计的基础上,按照对震源定位精度小于 8m 的技术指标要求,对 4 套 QS 系统共 12 个传感器阵列内的监测范围进行分析,并在分析过程中不断调整传感器的位置,以使对监测范围内的震源定位精度满足技术要求,并使监测范围达到最大值。

方案一:1451m 中段两套 QS 系统共 12 通道、1391m 中段两套 QS 系统共 12 通道;

方案二:1451m 中段一套 QS 系统共 6 通道、1391m 中段两套 QS 系统共 12 通道、1331m 中段一套 QS 系统共 6 通道。

A 1451m 中段 QS 系统布置方案

因 1451m 中段 42~46 线附近布置了沉淀池,50 线附近布置了变电所,52 线附近布置了溜矿井,故初步考虑在 42 线、46 线、52 线、56 线各布置一个传感器。其中在 52 线的为三分量传感器,其余为单分量传感器。

1451m QS 系统布置方案:布置在 1451m 中段的 42 线、46 线、52 线、56 线,传感器布置如图 5-2 所示。

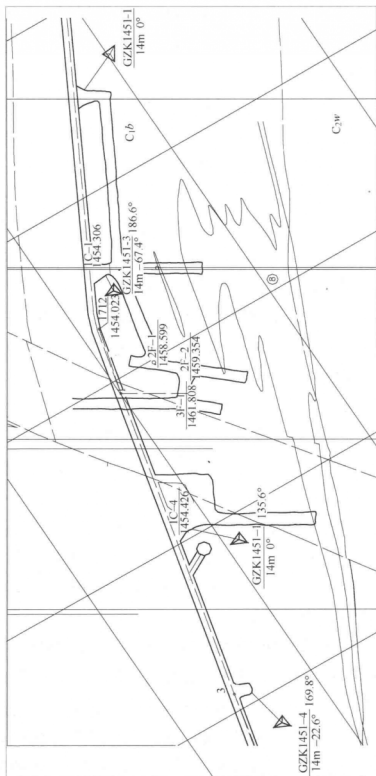


图 5-2 1451m 中段 QS 系统工程布置图

1451m 中段通信电缆布置方案: QS 系统拾震器布置在 56 线, 传感器连接线从 42 线、46 线、52 线勘探线进入 56 线, 连接至 QS 系统拾震器, QS 系统连接数据交换中心的连线由 56 线从 1451m 中段主运输巷至 2 号竖井附近的泄水孔, 通过泄水孔连接到 1331m 中段竖井口的井下数据交换中心, 共 701m, 考虑环境等因素的影响, 最终连接线的长度定为 800m。

B 1391m 中段两套 QS 系统布置方案

因 1391m 中段即将进行回采, 所以在该中段布置两套 QS 系统进行监测, 在矿体上盘布置 QS 系统时, 由于 1391m 中段 1 分层进行回采时爆破的影响, 数据传输线无法从矿体的上盘牵引至 1331m 中段斜井口的井下数据交换中心。所以, 在 1391m 中段的 QS 系统只能布置在矿体的下盘及矿体端部的上盘穿脉中。1391m 中段每套 QS 系统均由两个三分量传感器组成。

1391m 中段第一套 QS 系统布置方案: 布置在 1391m 中段的 48 号穿脉和 44 号穿脉, 传感器布置如图 5-3 所示。

连线布置方案: QS 系统拾震器布置在 44 号穿脉, 传感器连接线从 48 号穿脉进入 44 号穿脉, 连接至 QS 系统拾震器, QS 系统连接数据交换中心的连线由 44 号穿脉从 1391m 中段主运输巷至 1391m 中段 64 号穿脉的工程钻孔, 通过工程钻孔连接到 1331m 中段的井下数据交换中心, 共 989m, 考虑环境等因素的影响, 最终连接线的长度定为 1100m。

1391m 中段第二套 QS 系统布置方案: 布置在 1391m 中段的 56 号穿脉和 64 号穿脉, 传感器布置如图 5-3 所示。在 1391m 中段, 施工一铅直工程钻孔到 1331m 中段, 便于 QS 系统的布置。

1391m 中段通信电缆布置方案: QS 系统拾震器布置在 64 线工程钻窝中, 传感器连接线从 56 线勘探线进入 64 线, 连接至 QS

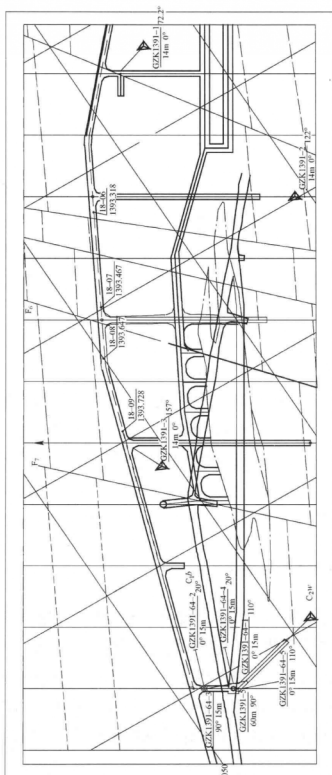


图 5-3 1391m 中段 QS 系统工程布置图

系统拾震器, QS 系统连接线从 64 号勘探线进入工程钻孔, 通过 1331m 中段主运输巷连接至井下数据交换中心, 共 707m, 考虑环境等因素的影响, 最终连接线的长度定为 800m。

C 1331m 中段 QS 系统布置方案

因 1331m 中段也即将进行回采, 所以在 1331m 中段也布置一套 QS 系统进行监测, 在矿体上盘布置 QS 系统时, 由于 1331m 分层进行回采时爆破的影响, 数据传输线无法从矿体的上盘牵引至 1331m 中段斜井口的井下数据交换中心。所以, 在 1331m 中段的 QS 系统也只能布置在矿体的下盘及矿体端部的上盘穿脉中。1331m 中段 QS 系统均由一个三分量传感器和三个单分量传感器组成。

1331m QS 系统布置方案: 布置在 1331m 中段的 52 线、56 线、64 线、70 线, 传感器布置如图 5-4 所示。

1331m 中段通信电缆布置方案: QS 系统拾震器布置在 58 线, 传感器连接线从 52 线、56 线、64 线、70 线进入 58 线, 连接至 QS 系统拾震器, QS 系统连接数据交换中心的连线由 58 线从 1331m 中段主运输巷至 2 号竖井附近的井下数据交换中心, 共 575m, 考虑环境等因素的影响, 最终连接线的长度定为 650m。

5.2.2 微震监测系统方案优化

在充分考虑前述 6 大影响因素后, 还需考虑在较经济的基础上对监测系统进行优化, 合理地对传感器进行空间布置与分配, 以期在满足微震监测工程技术指标的条件下, 使传感器阵列的监测范围最大, 在监测范围内的主要技术指标 (如定位精度) 不低于工程所需的指标。完成这个工作的过程就是对微震监测系统方案的优化设计。

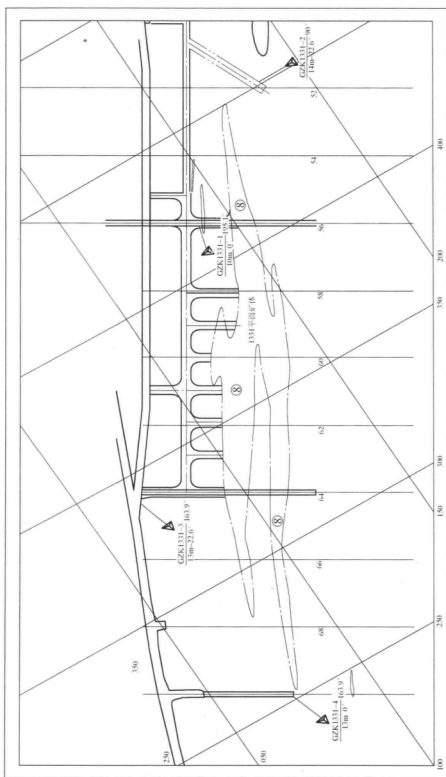


图 5-4 1331m 中段 QS 系统工程布置图

由于地下采矿活动的特殊性和工程施工的影响,对微震监测系统的优化设计不能仅仅依靠理论分析。在前面初步设计的基础上,考虑到微震监测系统能够在微震事件出现时就近触发不同 QS 系统传感器的优点,以及震源定位精度小于 8m 的技术指标要求,并考虑将来开采下部矿体时微震监测系统的通道扩展问题,作者详细分析了 4 套 QS 系统共 12 个传感器阵列的监测范围,并在分析过程中不断调整传感器的位置,以使监测范围内的震源定位精度满足技术要求,并使监测范围达到最大值。经反复多因素优化分析,得到了最佳的传感器布置方案,即为方案二,优化的 12 个传感器空间坐标位置如表 5-1 所示。

表 5-1 传感器空间坐标位置

传感器编号	空间坐标		
	x	y	z
1331_1T	406.0	137.0	1332.0
1331_2U	466.0	183.0	1329.0
1331_3U	331.0	70.0	1328.0
1331_4U	243.0	75.0	1333.0
1391_1T	581.0	175.0	1392.0
1391_2T	502.0	193.0	1392.0
1391_3T	435.0	93.0	1392.0
1391_4T	352.0	107.0	1393.0
1451_1T	498.0	101.0	1454.0
1451_2U	630.0	148.0	1453.0
1451_3U	575.0	115.0	1444.0
1451_4U	443.0	85.0	1448.0

注:传感器编号 T 为三分量传感器,U 为单分量传感器;x 轴省略前 4 位有效数字,y 轴省略前 3 位有效数字。

5.2.3 微震监测系统定位精度分析

微震事件定位是微震监测中最经典、最基本的问题之一^[43,106~111]。衡量一套微震监测系统的性能和可靠性,主要取决于其定位精度,以及满足定位精度要求的监测范围与监测对象是否一致。研究表明,微震监测系统定位精度除与监测系统仪器性能有关外,主要取决于速度模型、监测网的传感器空间布置方式、传感器布置密度和纵波/横波波速参数的选取。在给定速度模型时,可以通过优化传感器空间位置,提高整个监测系统的性能。因此,需对前述方案进行震源定位精度测试分析,以确定最优化的微震监测系统网络布置。

微震事件定位问题也就是确定微震事件的震源位置与传感器之间的距离,如图 5-5 所示。按照 P 波、S 波到时来确定微震事件震源位置的方法是点定位技术。点定位技术是求算微震事件的精确坐标值,这种方法应用非常广泛。点定位技术主要分为两种方式,即时间残值最小平方拟合法和迭代技术,而把两者组合起来的方法则称为混合法。本微震监测系统具有 24 通道,属于多台

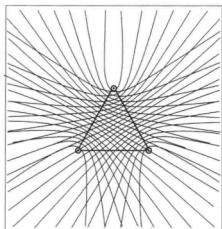


图 5-5 微震事件定位场

站定位。所以,本研究采用高桥法对微震事件进行震源定位分析。设包含微震事件位置和时间的未知参量方程为

$$x = (h, t_0)^T = (x_0, y_0, z_0, t_0)^T \quad (5-1)$$

式中 x_0, y_0, z_0 ——微震震源的空间位置坐标;

t_0 ——微震事件发生的时间。

定位分析是试图使得到时差或残值最小化。对于测试震源定位来说,一种简化的方法是使被观察到的到时与计算出的到时的误差最小。为了确定这种最小误差,在所研究的区域内用网格搜索对测试事件定位进行系统的三维搜索。对于各种测试定位,一般是计算出在传感器位置上的被估计的到时,并且与被测到时进行比较,进而得到一个偏差估计值。两类偏差一般按以下方法计算。

L_1 范数拟合函数 (绝对偏差估计):

$$E = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|T_{oi} - T_{ci}\| \right] \quad (L_1 \text{ 范数}) \quad (5-2)$$

或 L_2 范数拟合函数 (最小平方估计):

$$E = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|T_{oi} - T_{ci}\|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (L_2 \text{ 范数}) \quad (5-3)$$

式中 N ——观察到的传感器到时个数;

T_{oi} ——观察到的第 i 个传感器的到时或走时;

T_{ci} ——第 i 个传感器的计算到时或走时。

在计算过每个网格点的误差之后,误差实际上就已被映射在三维空间上,这个空间被称为误差空间。理论上,最小的误差空间就是真实事件定位的最佳估计值。

高桥法进行微震震源的定位分析是从一个初始试验解通过迭代计算而获得其最终的数值解。在每步迭代中, 计算出一个修正矢量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t)$, 并加到前解中求得一个新解。不断进行迭代运算, 直至修正矢量满足一个预先设定的误差判据。根据时间-距离方程, 可以得到该算法的误差判据为

$$[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]^{\frac{1}{2}} = v(t_i - t) \quad (5-4)$$

式中 x, y, z ——试验解的坐标;

t ——事件发生的时间;

x_i, y_i, z_i ——第 i 个传感器的位置坐标;

t_i ——第 i 个传感器的到时值。

如果试验解接近真实解, 那么观察到时 t 就可以按照试验解用 Taylor 公式展开处理, 得

$$\frac{\partial t_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial t_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial t_i}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial t_i}{\partial t} \Delta t = t_{oi} - t_{ci} \quad (5-5)$$

式中, t_{oi} 、 t_{ci} 与前述意义相同, 且

$$\frac{\partial t_i}{\partial x} = \frac{x_i - x}{vR}$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial y} = \frac{y_i - y}{vR}$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial z} = \frac{z_i - z}{vR}$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial t} = 1$$

$$R = [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]^{\frac{1}{2}}$$

或者可用矩阵表示为

$$A\Delta x = B \quad (5-6)$$

该方程组可用高斯消去法求解，即

$$A^T A \Delta x = A^T B \quad \text{或} \quad \Delta x = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (5-7)$$

将由式(5-7)求得的 Δx 加入前一次试验计算结果中，形成一个新的解，重复上述过程，直到最终的试验计算结果满足给定的误差判据，计算结束，这个最终的解就被视为最终的真实事件定位坐标值。

本次研究计算参数为：①纵波波速为 $V_p = 5600\text{m/s}$ ，横波波速 $V_s = 3550\text{m/s}$ ；②P波和S波到时差值为 1.5ms ；③传感器可记录的最小峰值质点速度(PPV)为 0.02mm/s ；④传感器坐标误差为 1m ；⑤同一个微震事件触发的最少有效传感器个数为5个。计算公式如下：

$$\left. \begin{aligned} V_p &= 5600(1 \pm 10\%) \text{m/s}, V_s = 3550(1 \pm 10\%) \\ \lg \text{PPV} &= 0.45 \lg E - 1.531 \lg R + 1.523 \end{aligned} \right\} \quad (5-8)$$

根据拟定的传感器空间阵列布置(即方案2)，如图5-6所示。采用不同的灰度绘制出不同中段平面的微震事件定位坐标期望标准误差云图，单位为m，右下角为定位误差标尺。从定位误差分析结果可知：在监测网络核心部位定位精度可以达到 1m ；而整个8号矿体范围内最大监测误差为 8.0m 。2007年8月4日、5日和6日，利用微震监测系统对人工震源进行定位测试，如表5-2和图5-7、图5-8所示，三次人工震源定位测试最大误差为 8.804m ，最小仅为 0.315m 。因此，该微震监测系统传感器阵列

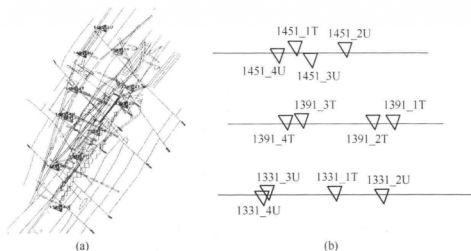


图 5-6 传感器空间阵列布置

(a) 俯视图; (b) 侧视图

网络布置合理，能够保证监测数据的真实性和可靠性，完全能够达到矿山安全生产的要求。

表 5-2 人工震源定位测试结果

测点	实测坐标 /m		系统定位坐标 /m		误差 /m	震级 /级	触发传感器 个数/个	弹性波速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
								V_p	V_s
1	x	499.438	x	503.000	8.804	-0.7	11	5142	3174
	y	160.959	y	169.000					
	z	1391.589	z	1392.000					
2	x	505.149	x	505.445	0.315	-0.7	10	5215	3154
	y	164.127	y	164.226					
	z	1391.937	z	1391.891					
3	x	437.865	x	437.000	3.233	-0.9	11	5141	3179
	y	117.073	y	114.000					
	z	1392.492	z	1393.000					

注: x 轴省略前 4 位有效数字, y 轴省略前 3 位有效数字。

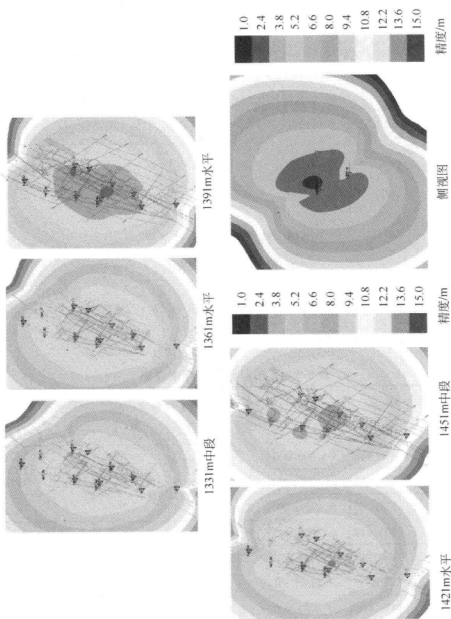


图 5-7 定位精度敏感度分析

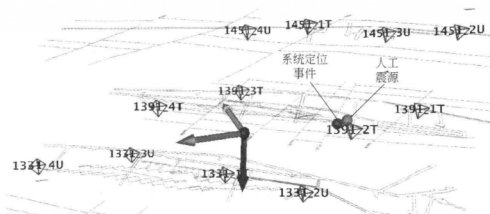


图 5-8 人工震源定位测试

5.3 预测预警模型的建立

5.3.1 微震监测参数的确定

岩体微震事件产生的有用信息是十分丰富的，如何利用这些信息，更准确的确定被测岩体的性态改变是该领域研究的大课题，考虑事件率 C 、综合值 m 等参数，具体如下所述。

(1) 微震事件率 C 。单位时间的微震事件数。

(2) 微震事件能量 E 。取各次抽样间隔内最大能量作为评价指标，即 $E = \max(A_i)^2$ (A_i 为最大振幅值)。

(3) m 值。事件振幅值与事件率之比，由最大似然率法计算：

$$m = \frac{n \lg e}{\sum (n_i \lg A_i) - n \lg A_m} + 1 \quad (5-9)$$

式中 n ——振幅大于 A_m 的事件总数；

n_i ——振幅为 A_i 的事件数;

e ——自然对数的底。

(4) 视应力。视应力 σ_A 是剪切刚度 μ 与地震能 E 和地震矩 M 比值的乘积, 即

$$\sigma_A = \mu \frac{E}{M} = \frac{E}{\Delta \varepsilon V} \quad (5-10)$$

视应力是量测震源内动态应力释放的参数, 它的量值与震源模型无关, 用它描述震源应力降比 $\Delta\sigma = \frac{7M}{16r^3}$ 计算的静态应力降更可靠。地震震源是一个软弱的裂纹贯通地质体时, 这种震源将在较低的应力作用下缓慢屈服, 虽然产生较大地震矩, 但释放的能量较少, 这时的视应力较低; 反之, 坚硬岩石作为震源时将产生较高的视应力。在同一矿山或采区, 地震矩相同的地震事件释放的能量可能有较大差别, 表明应力水平有所差异。

(5) 视体积。视体积 V_A 是量测震源体积 (岩体内发生同震非弹性变形的体积) 的参数, 它具有标量的性质。地震活动性分析时, 累计视体积 ΣV_A 随时间变化曲线的斜率常被认为是表示岩体应变速率的重要指标。震源体积可以用地震矩和静态应力降计算, 即

$$V_A = \frac{M}{2\sigma_A} = \frac{M^2}{2\mu E} \quad (5-11)$$

鉴于静态应力降 $\Delta\sigma$ 是一个与震源模型有关的参数, 为了寻求与震源模型相关性更小的描述震源体积参数, 引入了视体积概念。

(6) b 值。 b 值是表示大小地震数目按震级分布的一个参数。研究表明: b 值大小取决于该地区介质的应力状态与岩石结构。

在一般情况下,应力状态和岩石结构变化不大,所以, b 值基本上保持常数。但是大震前,震中区及其附近的地壳内,应力状态和岩石结构都可能发生明显变化,与此相应的 b 值也会偏离正常值,出现异常高值或异常低值。

5.3.2 微震监测相关参数的幂律特性

岩爆从孕育、发展到发生的各个阶段都有与其对应的前兆,微震监测通过对微震波中蕴含的大量岩石内部状态变化信息的分析、处理,可以找出岩体破裂失稳的具体参数,其主要包括时空位置、能量和通道类型。然后根据震源参数的变化情况,结合矿山压力、动力学等多学科理论,即可进行岩爆的超前预测预警^[112]。为了将微震监测技术运用到岩爆预警中来,首先要对微震监测的主要参数特性及其之间的相互关系进行深入分析,在此基础上探讨其与岩爆孕育到发生之间的内在关系,继而给出岩爆临界预警体系雏形。

自然界与社会生活中存在各种各样性质迥异的幂律分布现象。幂律分布表现为一条斜率为负幂指数的直线,这一线性关系是判断给定的实例中随机变量是否满足幂律的依据。式(5-12)为一般幂律分布公式^[113,114]:

$$D(v) = Kv^{-a} \quad (5-12)$$

式中 $D(v)$ ——分布函数;

v ——事件规模。

在实际应用中, $D(v)$ 一般定义为规模大于 v 的事件出现的频率,规模 v 取尺寸量纲,如长度、体积、面积等。幂律分布广泛存在于自然界与日常生活中,包括地震规模大小的分布(古登堡-

里克特定律), 计算机科学等, 且表现形式多种多样。

通过对会泽铅锌矿微震监测系统记录的大量数据分析, 利用系统自带软件对其中主要参数进行深入研究发现: 微震震级与微震事件频率之间、微震能量与地震矩之间以及视应力与地震矩之间都存在幂律分布特性。同时, 基于井下重点监测区域发生的岩体失稳现象, 分析了岩体失稳前兆和事件频度、累计视体积等微震参数随时间变化关系, 发现微震监测主要参数在岩体失稳之前呈现出异常变化趋势, 而且利用这些参数变化征兆来研究井下岩爆灾害时间阈值完全可以满足预测预报要求。

本节主要探讨微震能量 E 和地震矩 M 双对数之间、不同震级分布以及视应力和地震矩之间的幂律特性, 其他类似参数也都具有一致性。lgAs 与 lgM 关系图和不同震级分布图都呈现出幂律关系, 如图 5-9 所示。

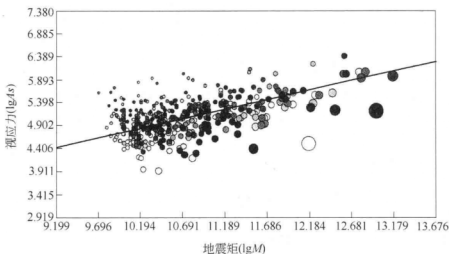


图 5-9 视应力与地震矩的双对数关系

在学术界, 关于地壳地震圈地震事件视应力是否取决于(地震矩数量)震源尺寸大小的争论一直没有停止^[96]。从监测区域得

到的地震数据通过自带软件分析显示其视应力是依赖震源尺寸大小的。由图 5-9 可看出视应力大体上是随着地震矩增加而增加的。已有的研究已经表明,随围岩应力增加, y 轴的截距也随之增大。拟合的斜率(幂律指数)与地震刚度、抵抗地震变形、震源体积成比例。由视应力 σ_A 与地震矩 M 关系可知:

$$\sigma_A = \mu \frac{E}{M} = \frac{E}{\Delta \varepsilon V} = \frac{E}{P} \quad (5-13)$$

式中 $\mu, \Delta \varepsilon$ ——地震刚度, 应变变量;

P, V ——地震势, 震源体积。

视应力是度量震源内动态应力释放的参数, 它的量值与震源模型无关。岩体失稳动力学过程可用式 (5-13) 来表示, 其依赖于失稳岩体与周围岩体的刚度之比, 刚度比越大, 震源区单位体积岩体弹性变形释放能量就越多。若矿区地震刚度下降, 累计事件分布将在大于一定规模地震矩 M 时达到峰值。

由式 (5-12) 可知, 幂律分布的绝大部分事件规模较小, 仅有少数大规模事件。通过图 5-10 事件数与震级的关系分布可以看

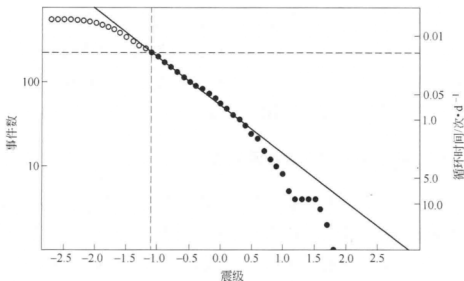


图 5-10 事件数与震级关系分布

出其前半部分线性特性并不是很强,而后半部分则近乎为一条直线,其斜率的负数即为幂指数。虽然复合系统发生的小事件比大灾难多,但遍及所有规模的连锁反应是动态特性的一个必不可少的部分,因而小事件和大灾难的发生都起因于同一种机制,并且,复合系统永远不会达到平衡态,而是从一个亚稳态向下一个亚稳态进化。地震震级大于 M 的地震数目 N 满足如下关系式:

$$\lg N = a - bM \quad (5-14)$$

式中 a ——微震活动性参数;

b ——监测时间段内小震个数与大震个数的相对数。

上述关系式不仅适用于区域地震活动,对全球范围的地震活动也都适用,这说明地震震级 m 与其相应的发生频率之间也存在幂律关系。同时,幂律分布亦是稳态过渡到混沌的一个标志,利用这一特性便可以预测这类系统的相位及相变。借助自组织临界理论^[115],当大量的构成井下岩体失稳的成分组成的系统自然地自组织临界状态发展;当系统达到这种临界状态时,即便是很小的干扰事件都会引起系统发生一系列灾变,而这和微震监测参数在岩体失稳前的异常变化正好一致,说明研究微震监测参数的幂律特性是有必要的。但不同的幂律分布幂律指数有很大的不同,而导致这一现象的原因还不清楚,需要进一步的研究。

5.3.3 微震参数与岩体裂隙演化关系

矿(岩)体裂隙扩展演化过程正是岩体大规模破坏的基础,其内部缺陷在采动的影响下逐步活化、加剧,当达到一定能量门槛值时即会触发预先布设在岩体内部的微震监测探头,从而将矿(岩)体裂隙扩展演化过程以电磁波谱这一形式记录下来,通过

由微震监测系统接收的地震波形中蕴含的信息来量度裂隙演化过程就变成了可能。下面主要以视应力、能量指数和微震活动性参数 b 值与裂隙扩展演化之间的关系进行分析。

由前期现场裂隙调查可知,裂隙多发生在巷道交叉处、采场、斜坡道等,在矿井深部这种现象尤为明显。通过对上述区域裂隙特征与微震参数变化关系分析发现,在裂隙发育和扩展前后视应力、能量等微震参数均呈现出异常的变化。由图 5-11 可以看出,裂隙特征与微震参数能量和视应力变化趋势大致一致,对照井下实际采掘情况:正在回采 1391m 中段的 7 分层 2 盘区,采场现况为该盘区 3 号矿房正在进行回采,而 2 号矿房已回采结束,但还未充填,这就使得它们之间的 3 号矿柱应力集中。矿柱处于单轴受压状态,其内部产生大量的微裂隙,出现扩容现象,到一定程度时,岩体破裂,体积急剧增大,于是出现了图 5-12 中微震参数能量、视应力与裂隙特征突然增大后又急剧下降过程。

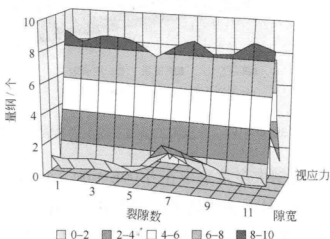


图 5-11 1391m 中段 7 分层 2 盘区 3 号采场裂隙特征与微震参数关系

由图 5-12 可以看出, 1391m 中段 7 分层附近区域的长期监测

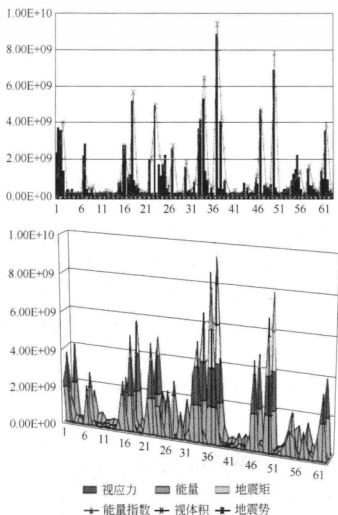


图 5-12 1391m 中段 7 分层附近微震监测主要参数数据统计

微震数据，其量纲大多数集中在 $0.00\text{E} + 00 \sim 4.00\text{E} + 09$ 之间，说明该附近区域岩体大多数处于稳定状态，只有少数参数的数据分布在 $6.00\text{E} + 09 \sim 1.00\text{E} + 10$ 之间，这应是受采动影响所致，也应是裂隙萌生并急速扩展的起因。

通常岩体的稳定性可以用刚度，即岩体抵抗应力增加而产生变形的能力来描述。当岩体总刚度保持不变，总微震潜能与采矿

开挖体积成正比,随着不断开采,岩体总刚度不断下降,岩体便表现出非线性变形,随着活动率的增大,微震潜能释放加速,预示着可能会发生较大的岩体失稳,这种岩体失稳过程可用上述提到的视应力来刻画。

根据这些迹象,寻找岩体失稳过程中应力软化阶段的迹象就演化为找出能量指数和累计视体积随时间变化发展规律,以代替微震动力学的应力随时间的发展。能量指数增加伴随正的累计视体积率表示应变硬化过程;能量指数下降伴随加速发展的视体积表示应变软化,预示着岩体进入不稳定状态。高精度微震监测系统可以监测上述岩体变形失稳的过程。

视体积的变化情况由累计视体积与时间的关系曲线表示,如图 5-13 所示。由图可知,曲线在 7~9h 区间突然变大,由 $1.11\text{E}-3$ 激增到 $2.13\text{E}-3$ 。对照井下实际采掘情况:正在回采 1331m 中段的 7 分层 1 盘区,采场情况为该盘区 4 号矿房正在进行回采,而 3 号矿房已回采结束,但还未充填,这就使得它们之间的 4 号矿柱

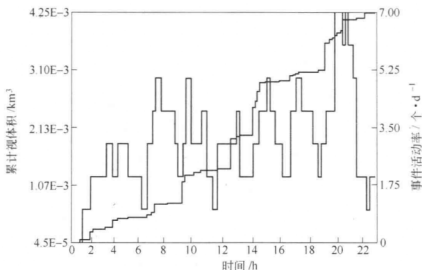


图 5-13 事件活动率和累计视体积随时间变化

应力集中。矿柱处于单轴受压状态，其内部产生大量的微裂隙，出现扩容现象，到一定程度时，岩体破裂，体积急剧增大，于是出现了图 5-13 中累计视体积的突然增大和事件活动率急剧下降过程。

作者^[116]研究了微震活动性参数 b 值分布特征与采场岩体失稳变化的关系，结果表明岩体失稳伴随着岩体内部微缺陷的压密致裂和新生裂隙萌生和扩展过程，而且这一过程和微震活动性参数 b 值变化密切相关。在采动影响下，采场及其附近局部岩体应力集中致使裂隙内部微缺陷压密并伴生新的裂隙产生、扩展，此阶段 b 值表现为缓慢增加或相对平静；一旦岩体发生破坏， b 值表现为急剧下降；此时可以认为是裂隙贯通和岩体破裂的临界状态，结合现场实践，分析认为 b 值越小，发生岩体破坏的概率越大，反之发生岩体破坏的概率越小。

由图 5-14 可以看出，微震活动性参数 b 值在门槛震级 -1.0 和 -0.5 以下时呈现出基本一致的变化趋势，在 120 余天监测时

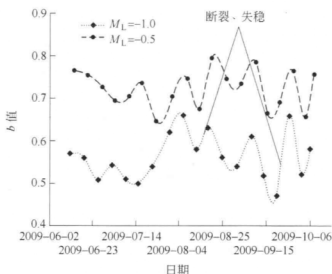


图 5-14 微震活动性参数 b 值随时间的变化

间段内, b 值起伏变化较大主要是在 2009 年 8 月 4 日和 2009 年 9 月 15 日, 对照井下岩体实际垮冒发现 (见表 5-3), b 值的突变可以用来预测岩体较大规模破坏和失稳过程, 同时在富水区域亦可作为水害临界或突水预报的重要指标。

表 5-3 2009 年 8 号矿体 6~10 月岩体失稳垮冒记录

岩体失稳垮冒地点	时 间	垮冒量	失稳、垮冒主要因素
1499m 分段 20 分层 3 号出矿道	8 月 5 日	80t	边界矿房充填未结顶, 空区内顶板暴露面积较大
1391 中段 7 分层 3 号出矿道	9 月 15 日	65t	上盘黄铁矿节理裂隙发育充分, 空区暴露面积较大, 充填不及时

另外, 其他微震监测参数在较大规模的突水等井下岩爆灾害前也会表现出不同的变化规律, 如岩体非弹性变形速率增大 (矿山地震学中用累计视体积随时间变化曲线斜率表示)、地震活动性增强 (单位时间内地震事件发生的频率增加)、岩体刚度变小 (矿山地震学中用 $\lg E - \lg M$ 关系回归直线斜率表示)、岩体发生应变软化等; 地震活动强度增大后又出现明显而短暂的降低 (短暂地震活动平静期), 一般预示着岩体失稳破坏 (岩爆) 即将发生; 在地震发生前还会出现地震黏度降低、扩散率增大和地震施密特数显著下降。

5.3.4 模型建立的原则

矿山岩爆灾害预测预警模型参数变量的选取应遵循以下原则:

(1) 变量具有代表性, 是岩爆灾害的直接表现或者是影响采空区岩体稳定的主体因素;

(2) 所有的变量都应能反映出整个系统的运动特征;

(3) 兼顾到监测资料的限制,即监测资料的可测性。

在矿山岩爆灾害预警中应选择能真正反映岩体变形破坏本质特征的参数作为预警参数。一般而言,矿山岩爆灾害微震预警的参数有累计事件数、事件率、累计视体积、累计能量、能率、事件活动率、震级-频度关系(b 值)、位移及震级等。

微震监测可以得到一系列的定量地震学参数。早期微震序列分析主要采用事件率或累计事件数和能率作为微震参数,现代矿山地震监测系统可以实现对多种定量地震参数的快速计算,使之应用于日常地震预测。如事件数、能量、矩震级、能量指数 EI 、地震视体积、平均时间间隔、地震黏度、地震扩散率、地震 Schmidt 数和地震刚度等。但是,现有关于这些参数时间序列在矿山地震预测中应用的报道主要体现在其成功的个别事例上,还没有足够深入的阐述。由于在矿山微震预警方面存在许多偶然性和不确定性因素,利用这些微震参数表示微震序列进行预警的成功率如何值得讨论,但是,可以运用已经发生的采场垮冒等岩爆灾害现象,结合微震监测事件特征,进行下一步微震事件处理和预警工作。

5.4 岩爆灾害预警关键点识别研究

本书利用常规监测和微震监测两种方法,进行了深井开采岩爆灾害预警关键点识别研究。

5.4.1 常规监测岩爆灾害预警关键点识别

为了深入研究岩体在受力状态下变形破坏预警关键点识别,需要分析岩体受力变形,从应力-应变曲线 B 点至 C 点的监测数

据来掌握岩体变形破坏发展过程（结合第2章图2-27）。然而，如何用力学参数来分析岩体塑性变形发展程度是一个值得研究的问题。

正切模量是指应力-应变曲线上每点的斜率。材料受力时，如果应力-应变在弹性阶段，正切模量就等于弹性模量；而在塑性阶段，其就会迅速降低。通常塑性材料应力-应变曲线是非线性的，一般来说，某点的正切模量是由该点附近应力变化量与应变变化量之比进行计算得来的。岩体材料不同于金属材料，它具有黏弹性，这就导致力与变形关系不是线性关系。所以，引用正切模量概念，其只能看做是非弹性极限范围内宏观模量的一种表述。因此，可以用B点之后的正切模量的变化来判断岩体变形破坏程度，从而识别常规监测岩爆灾害预警关键点，实现灾害准确预警。

利用现场监测仪器来获取可靠岩体力学参数是一种非常重要的途径。根据现场工程条件，结合深部回采计划需要，对8号矿体1331m、1345m、1369m、1391m四个阶段分别进行了应力位移监测，现选取1369m分段监测数据进行分析。围岩岩性属于C₁b，钻孔1369-1、1369-4分别安装多点位移计，用来监测位移变化，掌握由矿体回采引起的岩体变形情况；钻孔1369-2、1369-3和1369-9分别安装钻孔应力计，其中1369-3用来监测最大主应力变化（矿体走向方向）情况，1369-9用来监测矿体倾向方向应力变化情况；钻孔1369-7、1369-8分别安装多点位移计，用来监测最小主应力引起的岩体变形情况。

1369m分段应力位移监测设计如图5-15所示，监测数据如表5-4所示。因为仪器埋深为2m。所以，应变值为监测位移值（m）除以2（m）；正切模量为监测应力变化值与应变变化值之比：

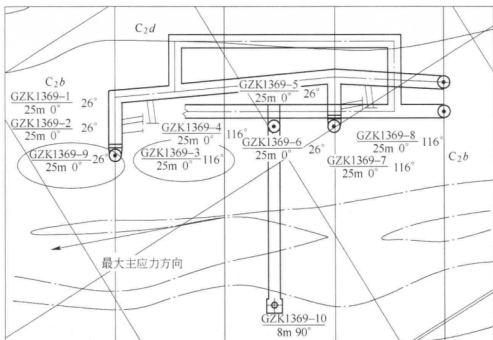


图 5-15 1369m 分段应力位移监测设计

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (5-15)$$

式中, 应力变化值 $\Delta\sigma$ 为监测应力值与起始值之差。如应力增量监测起始点为 2010 年 7 月 3 日的应力增量值 1.2MPa, 在拐点 B 处以后应力值的起始点为 2010 年 8 月 27 日的应力增量值 8.8MPa。考虑相邻位移监测数据相对较小和多点位移计监测精度的影响, 会导致应变增量值较小, 因此在处理前期应变值时, 考虑利用不同监测位移次数取应变平均值, 作为不同监测次数的应变值, 如式 (5-16) 所示:

$$\Delta\varepsilon = (l_1 - l_2)/2n \quad (5-16)$$

式中 l_1, l_2 ——监测位移值 (仪器埋深为 2m), m;
 n ——监测次数。

表 5-4 1369m 分段应力位移监测成果

时 间	位移 /mm	应变	应力 增量 /MPa	正切 模量 /MPa	时 间	位移 /mm	应变	应力 增量 /MPa	正切 模量 /MPa	备注
2010-07-03	0	0	1.2	/	2010-09-02	2	0.01	9.2	767	仪器 埋深 为 2m
2010-07-09	0		2	2000	2010-09-08	2		9.4	723	
2010-07-15	0		3.1	1240	2010-09-14	2		9.8	700	
2010-07-21	0		4.7	1175	2010-09-20	3	0.015	9.9	660	
2010-07-27	0		5.1	1133	2010-09-26	3		10.1	631	
2010-08-03	1	0.005	5.8	1160	2010-10-01	3	0.015	10.2	600	
2010-08-09	1		6.7	1117	2010-10-07	3		10.2	567	
2010-08-15	1		7.4	1057	2010-10-13	4	0.02	10.1	505	
2010-08-21	1		8.7	1061	2010-10-19	4		10.2	486	
2010-08-27	2	0.01	8.8	880	2010-10-25	4		10.2	464	

通过对 1369m 分段岩体应力变形监测,发现在监测初期,应力增量值仅为 1.2MPa。随着采矿工程逐步进行,应力逐渐增加,相应较长时间内位移增加则不够明显,如图 5-16 所示,直至 B

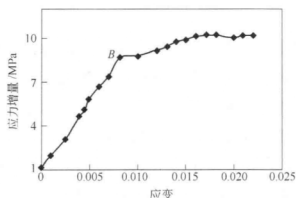


图 5-16 1369m 分段应力-应变曲线

点, 正切模量保持近直线上升, 正切模量平均达 1243MPa, 说明岩体处于弹性阶段, 应力增量随着开采的进行逐步增大, 岩体内部能量逐渐蓄积。如图 5-17 所示, 通过 B 点后, 应力增量值增加缓慢, 位移变化却较大, 正切模量快速下降, 变化趋于平缓, 仅为 880MPa, 说明岩体已经通过屈服点, 并逐步向失稳方向发展, 直至破坏前正切模量平均为 610MPa。因此可以把 B 点定义为预警点。超过 B 点后, 从岩体表观上观测到微裂纹扩展破坏, 能量得到一定的释放, 岩体承载力逐渐减弱, 破坏应变速度进一步加快, 直至 2010 年 10 月 28 日岩体出现局部破坏, 仪器无法进行监测。

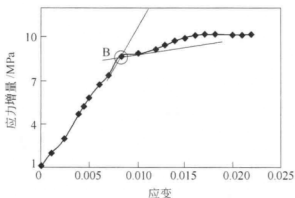


图 5-17 基于正切模量的预警关键点识别

从上述分析看, 把屈服点 B 作为预警关键点是合理的。但应力通过屈服点 B 后, 也可能出现应力增加缓慢、变形减缓情况, 这就会导致岩体经历很长时间才能到达峰值强度而开始破坏失稳。因正切模量在峰值强度时为 0, 这样就可以把屈服点至峰值强度正切模量 $E_B \sim 0$ 间划分几个区段来实现预警, 即现场根据不同的正切模量等级相应划分不同级别的采场, 然后根据不同级别的采场进行不同级别的地压管理。

5.4.2 微震监测岩爆灾害预警关键点识别

岩石是一种复杂的地质体,在外界载荷作用下,其内部存在的各种微裂纹由于形成贯通裂纹而会产生宏观破坏。岩体受力破坏过程是发生晶体位错、晶体间滑移、弹塑性变形、裂纹萌生、扩展、贯通直至发展成宏观失稳的过程,同时能量以应力波的形式向外传播微震和声发射事件。20世纪30年代,美国矿山局的Obert和Duvall发现受压作用的岩石结构内部有声发射活动存在,并于1940年在阿米克铜矿监测到爆发性声发射,从而预测出岩爆的来临。声发射现象是和岩石材料本身的物理力学性质、加载的过程及方式密切相关的,不同性质的岩石材料或不同加载方式和过程表现出来的声发射现象有所不同。

在岩石受力破坏全过程的声发射特性方面,国内外学者进行过广泛的研究^[117~119],如岩石受压、张拉、剪切和断裂试验条件下的声发射特性研究等,且主要是研究岩石峰值强度前的应力、应变与声发射参数之间的关系。而对于岩体受力变形过程的微震事件活动率与时间、视体积等参数之间的特征关系,则未见相关报道。

作者采用MTS815型液压伺服岩石力学测试系统及DYF-2便携式智能声发射仪进行了大量岩石破坏全过程声发射特性试验,如图5-18所示。通过对会泽铅锌矿白云岩(C_1b)、灰岩(C_2w)、石英砂岩(C_1d)、泥质页岩(C_3m)和矿岩等不同岩性试样进行单轴受力变形破坏全过程试验发现:岩石声发射事件活动率在不同的应力状态表现不同的变化特征,声发射事件活动率在应变变化与应力水平之间存在两种关系且有很大区别。结合图2-27所示的岩石变形全应力-应变曲线,在压密阶段(OA阶段),声发射

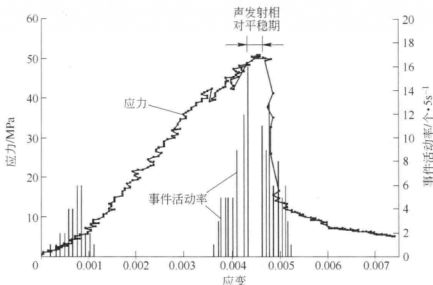


图 5-18 岩石全应力-应变曲线与声发射事件活动率关系

事件明显增加，表现为活跃状态，但声发射事件能量和震级都不足以使试样产生大规模的破坏；试样进入弹性阶段（AB 阶段）后，试样内部分子或原子由于受力而发生位错，而此过程没有产生大量声发射事件，声发射事件骤然下降，甚至趋于零事件；当试样继续受力进入屈服点（B 点）后，声发射事件急剧增加，在进入峰值强度前，声发射事件出现一个明显的相对平稳期，在峰值强度时又会出现声发射事件大量急剧增加，直至失稳破坏。据此，作者把声发射监测进入事件活动率降低点作为岩爆灾害预警点。预警并不意味着岩体会马上发生岩爆灾害，而是岩体发生了破坏，随着对岩体的进一步监测，可以掌握岩体的变化状态，从而采取相应的防护措施；作者把试样进入声发射事件平静期起始点作为岩爆灾害发生的预警关键点。随着应力的增加，试样在快速进入声发射相对平稳期后趋于破坏。需要指出

的是,在大量实验中,采用的试验岩样均为弹塑性材料,在试样受力变形破坏过程中,压密阶段和塑性阶段比较明显,声发射事件表现为余震-主震-余震型,该类围岩进行微震或声发射监测时容易对岩体破坏失稳关键点进行识别。而对于脆性材料岩石,虽然一般压密阶段和塑性阶段存在,但不够明显,仅产生很小的变形即破坏失稳。所以,利用声发射监测试样受力变形破坏全过程时,进入屈服点(B 点)后声发射事件还未出现很明显的增加就已快速失稳破坏,相应声发射事件表现为主震-余震型。该类围岩进行微震或声发射监测时,不容易对岩体破坏失稳关键点进行预警,或者说预警后岩体快速发生破坏失稳。如图 5-19 所示。

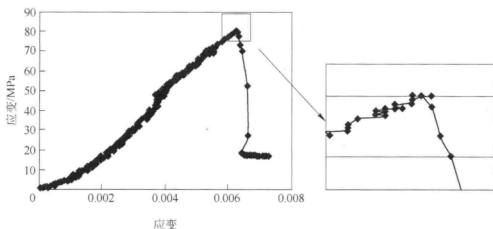


图 5-19 脆性岩石材料全应力-应变曲线

目前,对 8 号矿体主要采用微震监测手段实施深井开采岩爆灾害预警,常规监测辅助的方式。利用微震系统实现对岩体受力变形全过程超前监测。

如图 5-20 所示,岩体受力低能量小震级微震事件活动率和视

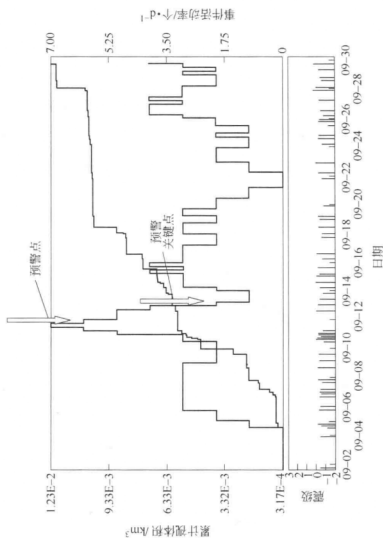


图 5-20 岩体失稳微震事件活动率预警关键点

体积都出现急剧增加现象,微震活动的空间分布如图 5-21 所示。2009 年 9 月 11 日 0~6 时左右,高能量高震级微震事件急剧增加,说明岩体通过了弹性阶段,开始进入屈服点 (B 点),在 9 月 11 日 10~12 时左右通过最高点 (峰值强度),而后 9 月 11 日 14 时左右,微震事件快速下降,作者认为此时是岩爆灾害预警点。9 月 13 日 0 时微震事件进入相对平静期,作者把此点作为预警关键点。9 月 14 日 0 时 8 号矿体 1331m 中段 1369 分段 6 分层 1 盘区 2 号出矿道附近发生巷道垮冒事故 (约 100t),如图 5-22 所示。研究表明:岩体受力微裂纹萌生、扩展直至失稳过程中,在屈服点附近发生微震事件剧增现象,随着应力的增加,微震事件进入平静期起始点,也就是岩爆灾害预警关键点,进入平静期后,岩体发生失稳破坏。在此过程中,岩体破坏失稳前伴随着微震事件视体积的剧增。该研究结论对深井开采岩爆灾害预警能够起到借鉴作用。

在岩体破坏失稳监测过程中,岩体动力失稳与微震事件活动

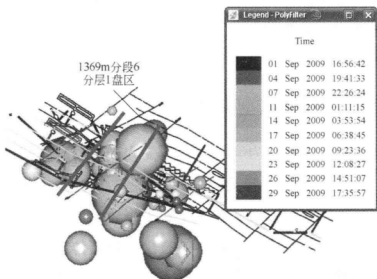


图 5-21 8 号矿体微震事件分布



图 5-22 2 号出矿道附近岩体垮冒

率降低及视体积增加之间的关系是充分不必要条件。所以，在监测过程中一定要注意，不是所有微震事件活动率降低或视体积增加都意味着岩体必然发生动力失稳破坏，但是其可以对岩体破坏过程起到警示作用，从而实现对岩爆灾害预警。

5.5 微震监测预测模型研究

开挖岩体是一种应力介质，当其受力破坏时，将伴随着能量的释放，微震即是这种释放过程的物理效应之一。在一定程度上，微震事件发生的强度和频度反映了岩体的应力状态和释放变形能的速率。更重要的是，岩爆灾害是开挖岩体在达到极限应力平衡状态后的一种破坏现象。一方面，破坏的岩体通常是在某些部位首先达到极限平衡状态，产生局部破裂，而与之相应的是微

震活动出现活跃期,并出现一定强度、能量和数量的微震活动;另一方面,地压活动的孕育和发生以岩体能量大量蓄积和急剧释放为前提,与岩体蓄积能量过程相对应的是微震活动出现平静期。因此,微震活动的时空变化规律包含有地压活动的前兆信息,微震产生的原因与岩体变形和破坏过程中弹性应变能的突然释放密切相关。

由于岩体材料本身的非均质性,其内部的应力场和强度并不是相同的。在外力作用下,岩体整体失稳前,其局部就已经出现不稳定状态。这种不稳定首先出现在原生裂隙的尖端处,随载荷增加,原生裂隙扩张,新的裂隙产生、贯通直至失稳破坏。现场观测及实验室试验均表明:微震现象贯穿岩体破坏过程。作为岩体变形破坏过程中的一种物理效应,微震信号的变化过程与岩体的破坏过程密切相关,可以作为一种观测手段来监测岩体的应力状态、变形速度等。因此,通过监测岩体在加载(卸载)过程中所产生的微震信号及其破坏过程,可以寻求岩体在失稳前的微震变化规律。

微震监测的目的是掌握岩体受力变形状态下微震活动随时间变化的过程。岩体微震监测预警就是根据监测到的微震参数的时间序列,来预测微震参数的发展趋势,对岩体未来可能发生的破坏进行预警。用于预测微震的方法有很多,一般来说,从理论上讲凡是具有时间外推性的模型均可作为预警方法,诸如常用的回归分析法、趋势外推法、最小方差法、马尔可夫法、曲线拟合法、灰色预测法等,均属于统计预测法的范畴。考虑到微震监测的特点、微震事件的特性,以及对岩体监测预警分析的方便性、准确性,建立岩爆灾害微震监测预测模型,可以为矿山安全生产提供参考。

5.5.1 现场监测数据分析

在现场监测的基础上,根据矿体回采和现场采场顶板垮冒情况记录,课题组研究人员和云南驰宏锌锗股份有限公司的工程技术人员于2007年8月2日开始,至2008年1月10日终止,全面完成了微震数据的处理和分析,结合采场的8次地压灾害事件情况,建立了基于微震监测参数的预测模型。部分监测成果如表5-5所示。

表 5-5 微震监测参数成果

序号	监测日期	微震监测事件参量					备注
		累计 事件数	事件 增量	事件率/h	累计事件率 增量/h	累计事件率增量 预测值/h	
1	2007-08-02	17	17	0.708333	0.7083	0.7083	
2	2007-08-09	30	13	0.541667	1.25	0.841606	
3	2007-08-16	33	3	0.125	1.375	0.700021	
4	2007-08-31	38	5	0.208333	1.5833	2.002066	
5	2007-09-19	100	62	2.583333	4.1667	3.051537	
6	2007-09-20	119	19	0.791667	4.9583	3.974585	
7	2007-09-27	140	21	0.875	5.8333	4.821155	
8	2007-09-30	147	7	0.291667	6.125	5.617072	
9	2007-10-07	147	0	0	6.125	6.37776	
10	2007-10-11	174	27	1.125	7.25	7.113321	
11	2007-10-18	202	28	1.166667	8.4167	7.830824	
12	2007-10-25	222	20	0.833333	9.25	8.535465	

续表 5-5

序号	监测日期	微震监测事件参量					备注
		累计 事件数	事件 增量	事件率/h	累计事件率 增量/h	累计事件率增量 预测值/h	
13	2007-10-31	234	12	0.5	9.75	9.231218	
14	2007-11-08	246	12	0.5	10.25	9.921221	
15	2007-11-15	275	29	1.208333	11.4583	10.60802	
16	2007-11-22	283	8	0.333333	11.7917	11.29375	
17	2007-11-29	291	8	0.333333	12.125	11.98018	
18	2007-12-06	316	25	1.041667	13.1667	12.66889	
19	2007-12-13	323	7	0.291667	13.4583	13.36122	
20	2007-12-19	374	51	2.125	15.5833	14.05841	
21	2007-12-26	379	5	0.208333	15.7917	14.76156	
22	2008-01-03	396	17	0.708333	16.5	15.47166	
23	2008-01-10	406	10	0.416667	—	16.18966	
24						16.91643	预测值
25						17.65279	
26						18.39953	
27						19.1574	

5.5.2 灰色预测分析

数据的背景是2007年8月2日~2008年1月10日段微震监测事件率累加值,在此基础上进行灰色预测,建立GM(1,1)

模型。

X 为给定序列:

$$\begin{aligned} X &= [x(1), x(2), \cdots, x(22)] \\ &= (0.7083, 1.25, 1.375, 1.5833, 4.1667, 4.9583, \\ &\quad 5.8333, 6.125, 6.125, 7.25, 8.4167, 9.25, 9.75, 10.25, 11.4583, \\ &\quad 11.7917, 12.125, 13.1667, 13.4583, 15.5833, 15.7917, 16.5) \end{aligned} \quad (5-17)$$

(1) $GM(1,1)$ 建模序列 $X^{(0)}$ 。

$$\begin{aligned} X^{(0)} &= [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \cdots, x^{(0)}(22)] \\ &= (0.5667, 0.9091, 0.8684, 0.38, 0.8403, 0.85, 0.9524, 1, 0.8448, \\ &\quad 0.8614, 0.9099, 0.9487, 0.9512, 0.8945, 0.9717, 0.9725, \\ &\quad 0.9209, 0.9783, 0.8636, 0.9868, 0.9571, 0.9754) \end{aligned} \quad (5-18)$$

(2) 模型选定。

1) $GM(1,1)$ 定义型:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \Rightarrow x^{(0)}(k) - 0.40083z^{(1)}(k) = 5.111343 \quad (5-19)$$

2) $GM(1,1)$ 白化响应式:

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(1)}(k+1) &= \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \Rightarrow \\ x^{(0)}(1) &= 0.7083 \\ \frac{b}{a} &= \frac{9.255823}{-0.05079} = -182.2371 \end{aligned} \quad (5-20)$$

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 182.3119e^{-0.05079k} - 182.2371$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k)$$

根据建立的 $GM(1,1)$ 模型, 可以预测微震监测参数, 得到 $k=23, \dots, n$ 的预测值。微震监测实测值与预测值关系如图 5-23 所示。通过以上分析可以得到以下结论:

- (1) 非等间隔 $GM(1,1)$ 在微震预测中是可行的;
- (2) 如果要进行短期预测, 预测值和实测值吻合较好。

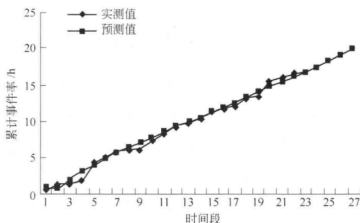


图 5-23 微震监测预测值与实测值对比

5.6 微震监测预警模型研究

采用微震监测技术, 是为了监测采场顶板冒顶和片帮灾害, 及时准确地对顶板的冒顶和片帮危害实施预警, 预防或减轻危害的破坏程度, 对矿山采场进行安全监测, 防止人员伤亡。

5.6.1 基于微震事件时空分布特征研究

针对采矿活动过程中诱发的微震事件, 可以选取一段时间内不同区域的微震事件的分布特征, 以及一定区域内不同时间的微震事件分布特征进行分析。准确掌握由于开采扰动形成的微震事

件时空分布特征,可以进行微震事件发生频率预警,撤离微震事件发生异常区域的工作人员和设备,或远离事件发生区域,以降低短期内人员作业的风险。对一段时间内微震事件发生的频率和震级的大小分布进行分析,可以得出井下不同采矿活动引起的区域内微震事件分布情况。在微震比较活跃时间或生产空间区域给出合理的调整计划或采取必要的措施是降低岩爆灾害发生的有效途径。

5.6.1.1 同一时间域不同空间域微震事件分布规律

矿山微震事件活动空间分布随时间变化而变化。所以,在进行矿山微震事件空间分布特征分析时,也应对特定空间内时间域的微震事件活动分布特征进行分析。研究生产活动区域内微震事件发生的空间分布,主要包括微震事件的水平分布、垂直分布和曲面分布。通常与建立的监测区域模型相结合,采用可视化软件JDi分析,对微震事件数据库中的一段时间内累计事件文件进行创建并导入,经过干扰波形的过滤,实现事件的过滤及模型中的任意剖面的显示和分析,得出微震事件的相对集中区域,识别地质构造活动区域(断层、构造)以及采场围岩变化情况。

微震事件区域分布特征在空间分布上极不均匀,表现为3个特征:集丛性、间断性和成带性。

(1) 集丛性。如图5-24(a)所示,在2009年4月14~20日和2009年4月21~30日,有两个微震事件活动的密集区,即图中重点标注区域,这些密集区正处于1331m中段、1391m中段的1499m分层的假底下采矿活动区域的关键部位,此处由于开挖岩体的应力扰动引起应力集中和变动,容易引发冒顶等岩爆灾害。

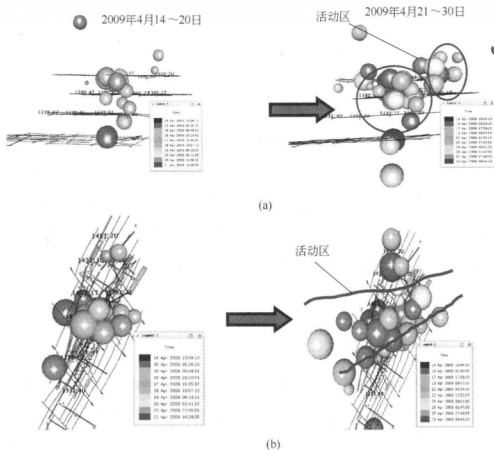


图 5-24 微震事件空间分布特征

(a) 剖面图; (b) 俯视图

(2) 间断性。在该监测区域，微震事件活动在空间分布上还呈现间断性不连续分布特点。如图 5-24(a) 所示，在两个圈定的区域中间，即微震事件发生密集带上，也存在微震事件活动相对稀少的小区域。在图 5-24(b) 中，也可以看出微震事件在密集带外较少发生，微震活动在空间分布上是间断的。

(3) 成带性。在 8 号矿体中，由于开采导致微震事件分布的显著特点是在矿体中部附近连成了一条微震活动的密集带，

如图 5-24(b) 所示。这条微震事件集中的密集带可分为两大部分：一是微震事件的中心区位于矿体中心位置，如图 5-24(b) 的左图；二是围绕中心区沿成带方向向外扩张区域。微震事件活动的成带特征和采矿活动密切相关，能够反映采矿生产活动的方向。

为了掌握井下矿体回采生产活动所诱发的微震事件分布，将分析区域确定为 1331m 中段、1391m 中段和 1499m 假底下采矿场。从图 5-24(a) 中可以看出，在 2009 年 4 月 14 ~ 20 日和 2009 年 4 月 21 ~ 30 日两个时间段内，微震事件主要集中在 1345m 至 1499m，分别出现两个微震事件集中发生区域。对比两个时间段的微震事件，结合井下回采情况，发现本时间段在 1391 中段 6 分层（标高 1405m）2 盘区以及 1499m 分层假底下采矿活动诱发微震事件增多，表明比较集中的频繁回采作业活动，及较大的采出矿量，对围岩影响较大。岩体裂纹由压密阶段开始扩展，一旦裂纹扩展到贯通阶段，极易造成采场垮冒或岩爆灾害，建议对该区域重点监测，采取一定的安全加固措施，有必要进行回采顺序优化或采用合理的采场结构参数。

从图 5-25 可以看出，8 号矿体 1451m 中段、1391m 中段及 1261m 中段都出现大量微震事件集聚，特别是 1391m 中段微震事件集聚较多。根据显示分析，可以大概估计微震事件集聚时间是在 2009 年 4 月 8 ~ 11 日、18 ~ 21 日、27 ~ 30 日，而该时间段现场生产活动如下：

(1) 1499m 分段回采 2 号盘区中部北端矿房，1510 号线 1 号、4 号出矿道拉进道；

(2) 1391m 中段回采 1405m 分段 1 号盘区北端、2 号盘区。1 号、2 号出矿道拉进道，10 号出矿道拉进道为分采作准备；

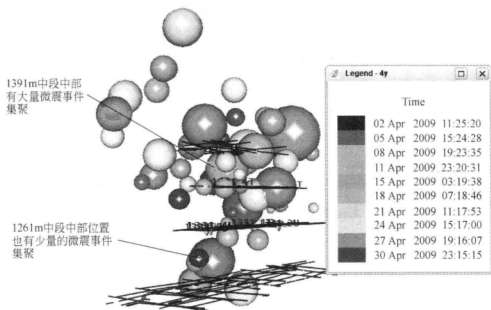


图 5-25 微震事件分布侧视图

(3) 1331m 中段在 1 号出矿道回采矿房, 2 号盘区 4 号出矿道收采。

综上所述, 这几个时间段里采场生产活动与现场微震监测相对应。

5.6.1.2 同一空间域不同时间域微震事件分布规律

在实际开采条件下, 微震事件的产生与时间相关, 并且可以利用统计学方法, 分析微震事件空间-时间-能量分布特征。对于采矿活动过程中诱发的微震事件, 可以采取一段时间内的事件小时累积分布或天累积分布进行分析。

图 5-26 是 2007 年 8 月 2 日 ~ 12 月 31 日, 8 号矿体回采过程诱发的微震事件累计数和视体积随时间变化曲线。曲线表明: 微震事件活动频次的随机性很强, 随时间变化起伏较大。

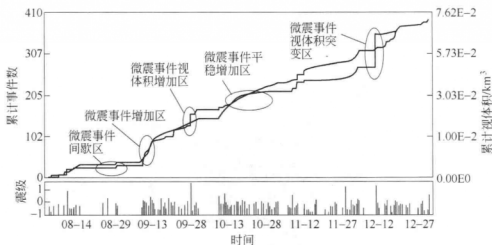


图 5-26 累计事件数和视体积随时间变化关系

8 号矿体回采诱发微震事件的时间特征可以概括为 3 点：平稳性、续发性和间歇性。

(1) 平稳性。研究发现，有些时段一定区域范围内微震活动的发生表现出一定的平稳特性。区域微震事件的发生常可用泊松分布过程近似，即意味着这些随机发生的微震波是相互独立的，并且微震发生率为常数，微震发生次数随时间呈线性增加。如图 5-26 所示，2007 年 10 月 13 ~ 20 日，微震事件随时间的变化率近似为直线，说明在这个时间段微震事件是近似以常速率发生的，显示出微震发生的平稳特性。

(2) 续发性。微震活动并不总是保持平稳状态，有些时候微震事件会频繁发生，显示出微震活动的续发性或散发性特点。岩体垮冒等灾害的前震和余震序列以及震群活动等都是微震活动续发性的表现，微震活动的续发性反映了区域应力或某一局部岩体应力的增强变化。如图 5-26 中显示的微震事件增加区——2007 年 9 月 6 ~ 13 日，在该时段发生前，微震事件发生表现为平静后以

震群的形式密集发生,并持续近一周的时间,表现为明显的续发特征。这种续发性微震事件发生特征是岩体裂纹发生贯通的前兆特征。

(3) 间歇性。监测表明:2007 年 8 月 21 ~ 29 日,微震活动既有密集发生的时段,也会出现间断性的平静状态,显示出微震活动的间歇性特点。在微震活动区或活动带上,微震活动突然减弱或中断,出现较长时间的相对间歇或平静期,可能是强微震事件发生诱发岩爆灾害的前兆,微震活动表现为续发性和间歇性交替活动情况。

通过对不同开采区域内事件的不同震级进行对比分析,可以得出不同时段内微震事件的震级大小分布范围,进一步研究震级大小和破坏之间的关系,有助于掌握生产活动区域内开采风险相对较大的作业地点。在视体积突变时微震伴随着强震级事件发生位置需要预警,利用系统自带 JDi 软件可以定位微震事件发生的位置,进行微震事件定位的可视化。

总之,8 号矿体的微震活动在时间进程中表现出复杂的平稳性、续发性和间歇性特征,反映了区域微震活动随采矿活动的动态起伏。

研究微震活动的时空变化,是为了找出它们与强震级微震活动的联系,从而有效地进行深井开采岩爆灾害预警。

5.6.2 基于微震监测事件参数位移变化的预警研究

微震事件参数位移变化随开挖的进行在不同时段内的变化率是不同的,许多时段会突然增大,而有些时段又会变小,总体呈非均衡增长模式。单从位移累积曲线来看,当它突然大幅度增大时则预示着破坏性微震事件或岩体破坏失稳的来临,这往往是岩

体破坏的前兆信息特征,通常这是岩体在受相对稳定和均衡外力作用下或其自身内部应力及变形的累积而形成的。但是在矿山开采条件下,由于受到频繁的采场爆破、掘进凿岩工作的影响,特别是当井下开采活动不稳定,以及地下采空区结构由于采掘活动突然产生较大的改变时,微震参数的累积量也将产生突然变化。这些变化常会在一定时间内重新达到平衡,微震事件会随之减少,同时其强度也随之降低。因此,当利用位移累积曲线变化预测微震事件变化规律时,必须结合井下开采活动才能反映实际情况。

基于微震监测数据,选取2009年4月14~30日微震事件分布特征,利用微震监测系统自带的XQuery软件进行该时段的微震事件导入,通过微震参数属性的设置,滤除了爆破作业、噪声和机械振动等干扰事件。采用可视化软件JDi进行分析,将微震事件导入矿体开采模型中,分析区域范围重点是介于8号矿体52号线至54号线之间。

图5-27所示为矿体逐步回采时,2009年4月在1391m中段6分层2盘区回采区诱发的微震事件活动分布。图中矿体包含在灰色矩形线框内表示为重点监测区域,中间微震监测事件表示了岩体位移变化特征,不同灰度表示位移发生的不同数值,不同灰度的微震事件表示了微震事件诱发岩体位移的发展过程。

从图5-27位移变化云图可以看出,岩体位移主要集中在52线和54线之间,并在断层附近有发展的趋势。从微震监测数据可以看出,岩体位移发展变化主要集中于断层附近。说明由于回采区域的不断扩大,诱发了断层附近岩体滑动产生位移。从图中可知,自1391m中段6分层2盘区3号矿房回采后,在52号线附近(图中区域A和B)产生了较大位移(4.57E-4m),随着采动的进行,

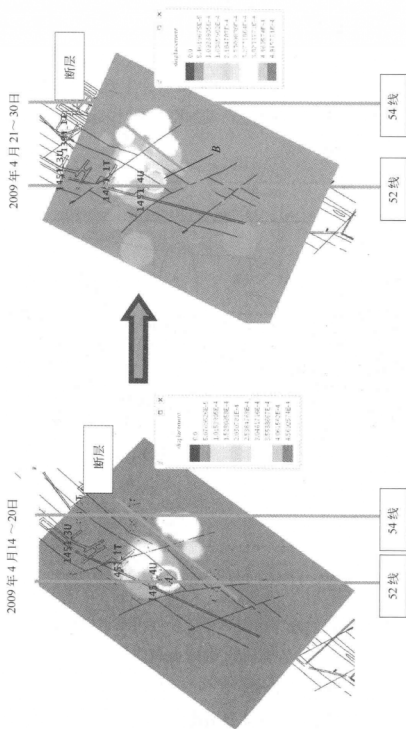


图 5-27 位移变化云图

位移逐渐增加至 $4.92\text{E-}4\text{m}$ ，变化量不大，但变形范围增加，特别是前方断层活动加剧。

如图 5-28 所示，椭圆形框内为采动区域，其他区域均已回采嗣后膏体充填。在 2009 年 4 月 14 ~ 30 日，主要对 3 号矿房进行回采，导致 52 ~ 54 线区域地压活动加剧。同时采动导致前方断层活化，微震事件活动频繁。

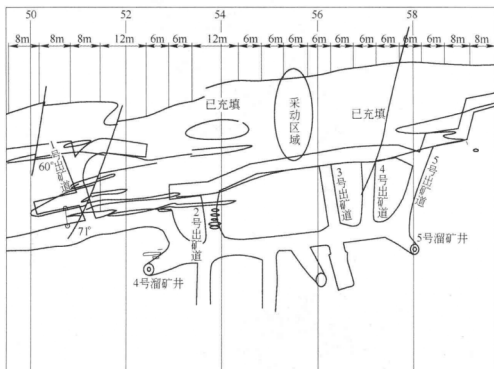


图 5-28 1391m 中段 6 分层 2 盘区回采情况

从图 5-28 可以发现，由于 3 号矿房回采形成空区，以及充填没有充分接顶的原因，在采动区域形成高应力区，导致位移云图发生突变，位移值不断增加，使该区域存在岩爆灾害诱发的可能，对此应加强现场监测和加固措施。

通过对不同开采区域内微震事件的不同位移进行对比分析，

可以得出发生在某段时间内微震事件的位移发展范围和趋势,进一步研究位移和破坏表现形式之间的关系,有助于掌握生产活动区域内开采导致岩体发生岩爆灾害的风险,为安全、高效采矿提供直观的判断依据。

5.6.3 基于微震事件参数视应力变化的预警研究

矿体的回采扰动了原岩应力状态,岩体破坏时,剪应力是产生微震事件的主要原因。在岩体破坏之前,作用于破坏面两侧的剪应力降低表现为震源应力降。根据定量地震学理论,震源岩体应力水平和应力降 $\Delta\sigma$ 可以用地震视应力 σ_A 来表示,震源破坏产生的变形则可以用位移来表示。因此,已知微震事件的空间位置 $X(x,y,z)$ 、发生时间 t 、震源视应力 σ_A 和位移 u ,则可求得该处岩体的应力和应变状态。也就是说,在一定的时间段 Δt 和空间体积 ΔV 的岩体内,可以用微震事件及其视应力和位移来描述岩体中的应力变形空间分布状态。

根据8号矿体的赋存条件和采矿工程布置特点,在不同标高水平上的应力分布状态可以简单直观的说明回采区域微震活动的总体应力分布。在视应力变化分析图中绘制了一系列不同时间段的视应力分布图,如图5-29所示(不同灰度代表了不同时间的视应力状态数据)。从图5-29视应力变化云图中可以看出,在断层位置出现了最大视应力为4.93MPa。随着回采进行,由左图可以看出视应力的两段应力集中区域没有贯通,但在断层附近形成了应力集中区(图中区域A)。从右图中可以看出,视应力变化范围不断增大,应力集中区域也不断扩大,但视应力值变化量较小。随着回采的进行,视应力由发生、集中、发展到贯通,说明大规模的采掘活动引起了明显的应力集中或变形集中。因此,随着采

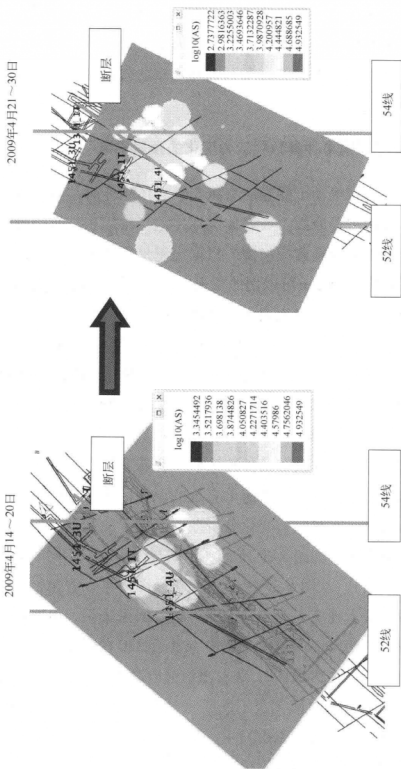


图 5-29 微震监测事件视应力变化云图

矿活动的进行,通过分析岩体视应力发展变化趋势,可以对该区域加强监测,保证安全生产。

5.6.4 基于微震事件活动率的预警研究

一定区域内一定时期的微震活动特性变化包括微震的时空分布特点、微震频度和微震强度等。研究微震活动性,主要是分析微震监测系统测定的微震发生的时间、空间位置和强度(震级或能量)等基本参数,并确定这些参数之间的相互关系。另外,也有学者把震源参数的变化(如地震矩、应力降、破裂性质和震源机制解等的变化)作为地震活动性的主要研究内容。

早期的研究侧重于描述微震的空间分布和分析地震活动的区域特性,后期的研究为了寻找强微震的前兆特征,也着重分析强微震前后的各种微震活动图像。然而,微震事件活动率反映了岩体内部微裂纹的扩展变化趋势,表现了微裂纹的产生和发展速度,微震事件突变特征体现了岩体开挖导致围岩发生岩爆灾害的前兆信息。

图 5-30 所示为微震监测事件活动率随时间变化关系。2009 年 4 月 9~10 日、17~19 日、26 日、29~30 日四段时间累计视体积和事件数量大量增加,说明微震活动频繁,微震事件活动率增加,而后处于平缓状态。微震事件聚集增加和视体积剧增是岩体能量释放的结果。微震事件活动率增加就是岩体裂纹从扩展到贯通的过程。结合现场生产活动分析如下:

(1) 微震事件发生的时间。经过上述分析可以看到,在该时间段,微震事件大量集聚在一个部位。根据图 5-30 所示微震活动率与时间的分布关系可以看出,能量先剧烈增加到一定程度,之后慢慢减小最后处于较平缓的状态,这就是岩体能量释放的

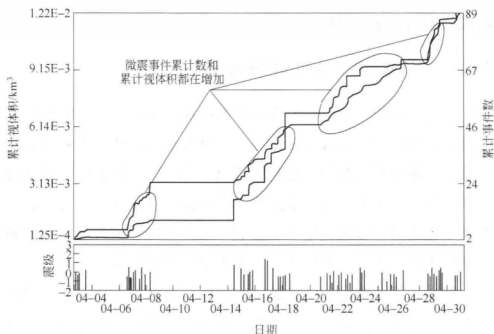


图 5-30 微震事件累计数和累计视体积与时间的关系

过程。

(2) 微震事件发生的地点。微震事件集聚位置在 1499m 分段采场 (坐标位置 $x=374180$, $y=2947660$, $z=1510$)、1391m 中段 2 号盘区 (中心坐标位置 $x=374067$, $y=2947470$, $z=1373$)。

(3) 建议采取的措施。在微震事件集聚的时间段和相对应的地点, 很有可能发生垮冒或者其他威胁人员和设备安全的事件, 应引起重视。在采场里做好人员随时撤离的安全通道, 每次进入采场作业前必须先清理顶板浮石并随时观察采场里是否有异常现象发生。严格控制矿房尺寸结构参数, 确保采场作业面安全。

5.6.5 基于微震活动性参数 b 值的预警模型研究

岩体在采动影响下产生微破裂, 由微破裂所耗散的一部分应

变能以弹性波的形式释放。这些弹性波就是采用微震监测获得的地震波,从物理的角度观察,岩体破裂过程是岩体不断产生微震波的过程,通过对微震波的拾取可以间接监测出岩体破裂过程。已有研究表明^[120]:岩体受力变形过程具有典型的分形特征,对于表征岩体受力变形过程的微震事件(参数)序列同样具有分形特征。

5.6.5.1 震级频度关系—— b 值

许多观测表明,开采诱发的微震事件与天然地震事件遵循同样的规则。通过分析两类地震活动性,均遵循古登堡-里克特所引入的频度-震级关系,该关系式适用于所有的震级范围。在某一段时间间隔 $[a, b]$ 内来研究微震活动性,可以得到一组震级随机变量 $\{M_i; t \in [a, b]\}$,对于一个微震监测区域来讲,微震的频次与震级服从指数关系^[121]:

$$n(M) = N_0 e^{-bM} \quad (5-21)$$

一般用对数形式表示,称为古登堡-里克特震级频度关系,写作

$$\lg n(M) = a - bM \quad (5-22)$$

式(5-22)中, $n(M)$ 是统计区域内一定时期发生的 M 到 $M + dM$ 的微震次数,称为微分频度。也可以用微震累计频度表示,若震级 M 以上的微震事件总数为 $N(M)$,则有

$$N(M) = \int n(M) dM \quad (5-23)$$

$N(M)$ 称为累计频度。同样有

$$\lg N(M) = A - bM \quad (5-24)$$

式 (5-24) 中, $A = a - \lg(b \ln 10)$, 两个未知数 a (或 A)、 b 对一定监测区域而言是常数。 a (或 A) 描述了监测区域微震活动的总体水平, 与起算震级以上的微震事件总数有关, 称为微震活动性参数。 b 是描述微震大小分布的参数, 通常接近于 1, 它描述了在一定的时段里小震个数与大震个数的相对数^[84]。

图 5-31 中灰色点表示该时间段内震级小于起算震级 $M = -1.0$ 事件个数分布; 黑色点表示该时间段震级大于起算震级 $M = -1.0$ 事件个数分布; 直线为震级大于起算震级 $M = -1.0$ 事件的震级频度关系; 曲线为该时间段大于起算震级 $M = -1.0$ 震级的事件拟合。

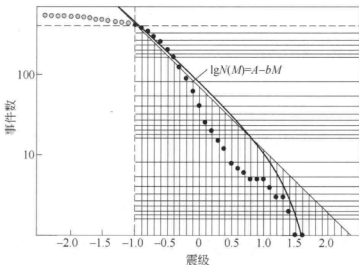


图 5-31 微震的累计事件数和震级关系

5.6.5.2 岩爆灾害的 b 值变化

由于 8 号矿体地质赋存条件复杂, 断层发育、附近岩体容易发生失稳破坏。因此, 8 号矿体在回采过程中具有开采扰动诱发

岩爆灾害的危险。由于 1451m 中段以上回采马上就要结束,即将进行 1331m、1391m 两个中段同时向上回采。所以,回采的重点是 8 号矿体的 1331~1451m。2007 年 8~12 月现场采场发生垮冒情况记录如第 4 章表 4-1 所示。利用微震监测系统,可以得到微震事件的监测时间、震级、 a 值、 b 值、事件数和最大震级等参数,2007 年 8~12 月的微震监测事件活动性参数 b 值记录如图 5-32 所示。

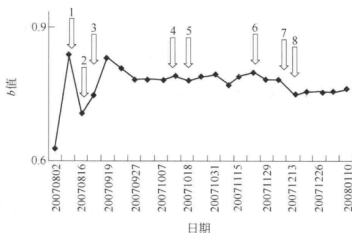


图 5-32 采场垮冒 b 值随时间变化关系

5.6.5.3 微震活动过程 b 值分形变化特征研究

b 值表示大、小地震发生的比例关系,物理含义是一个监测区域的 b 值变化表征着该统计地区岩体介质破坏发展的状态,前提条件是该监测统计区域内计算 b 值在一段时间内具有一致、统一的监测能力,以及在该监测地区整个范围内能监测到某个下限震级以上的所有微震事件。因此,岩爆灾害微震事件参数 b 值具有其特定的特征^[116,122~125]。

Hirasawa 认为,在恒定的短时间内,单位幅度的声发射事件

的最大振幅与裂纹体积关系满足:

$$A \propto V_v^{\frac{2}{3}} \quad (5-25)$$

式中 V_v ——相应产生一个声发射时间的裂隙体积,即损伤破坏的体积。

对于直径为 r 的只产生一个事件的微元体,单个声发射事件的振幅值为

$$A \propto r^2 \quad (5-26)$$

事件数 N 为

$$N \propto r^{-2b} \quad (5-27)$$

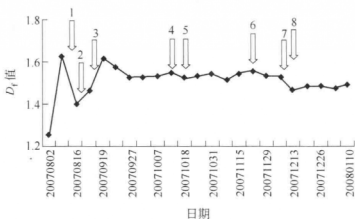
于是根据容量维的定义,得 Hausdorff 维数为

$$D_f = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln \frac{1}{r}} = 2b \quad (5-28)$$

从式 (5-28) 中可以看出:容量维数 D_f 是微震活动性参数 b 值的 2 倍,变化趋势和 b 值相同;岩体破坏前,容量维数下降;在 D_f 值平静期和 D_f 值增加时,不发生岩体破坏失稳状况; D_f 越小发生的微震事件震级越大。

从图 5-33 中发现采场垮冒微震事件活动分形维 D_f 值分布具有如下特征:

(1) 当 D_f 值呈增加趋势时,采场相对平静,无岩爆灾害产生。自 2007 年 8 月 2~8 日及 11 月 8~19 日,均无采场发生垮冒等岩爆灾害现象。 D_f 值增加,表明岩体裂纹的粗糙度在增加,在此期间岩体处于裂纹压密、扩展过程,小震级事件在总事件中的比例比大震级事件大,即 D_f 值的增加不会引起岩体动力失稳破坏。

图 5-33 采场垮冒 D_f 值随时间变化关系

(2) 当 D_f 值急剧下降, 也就是出现明显的降维现象时, 采场容易发生岩爆灾害。自 2007 年 8 月 9 ~ 9 月 12 日、10 月 10 ~ 18 日及 11 月 20 日、12 月 7 ~ 13 日, 均发生采场垮冒等岩爆灾害, 说明一旦裂纹扩展贯通, 形成动力失稳时, D_f 值下降, 表明岩体裂纹的粗糙度在降低, 加速了岩体破坏速度, 大震级事件在总事件中的比例比小震级事件大, 即 D_f 值的降低容易产生岩体动力失稳破坏。

(3) 当 D_f 值表现为平静期时, 岩体相对平静。自 2007 年 9 月 27 ~ 10 月 7 日、11 月 29 ~ 12 月 6 日, 岩体没有发生破坏, 说明岩体在 D_f 值处于相对平静期时, 岩体裂纹扩展平稳。

(4) 当岩体发生破坏时, D_f 值下降, 而后 D_f 值表现为增加或相对平静期。

(5) D_f 值越小产生的岩体动力失稳破坏越大, 反之, D_f 值越大发生岩体动力失稳破坏越小。由第 4 章表 4-1 知 2007 年 9 月 6 日采场垮冒量为 400t, 而图 5-33 中显示此时 D_f 值为较低值 1.398 ± 0.18 。

综上所述,岩体破坏时 D_f 值下降,而后 D_f 值表现为增加或相对平静,这表明随着分形维数的增大,岩石断裂面的粗糙度越大; D_f 值越小,表明岩体裂纹粗糙度越低,发生岩体破坏引起高震级微震事件的概率越大;反之,概率越小。也就是说 D_f 值减小发生岩体破坏的概率增加,反之发生岩体破坏的概率减小。

岩体在受力状态下所经历的物理过程是一个微断裂到宏观断裂突变过程。利用微震技术测得的采场岩体微震时间序列,从本质上刻画了岩体破裂过程。岩体微裂纹可转换为微震事件的空间分布,这个空间分布具有分形特征,其分维值随岩体微断裂的演化发展而减小,也就是说当岩石处于宏观断裂的临界点时出现分形维数的极小值。同样,反应岩体破裂过程的微震时间分布序列也具有上述这种特征,即在岩石宏观破裂的临界点,微震时间分布序列的分维值出现降维现象。需要指出的是,在岩体受力破坏过程中,岩体应力-应变曲线经过屈服点后,受到应力降低等其他因素,岩体可能产生局部破坏或裂纹扩展,微震事件活动性参数 b 值降低,但岩体未发生整体失稳情况,也就是说,岩体失稳破坏和微震事件活动性参数 b 值降低之间是充分不必要的条件关系,但随着回采的进行,岩体受力增加,掌握深部开采岩体破坏全过程微震事件活动性参数 b 值的变化趋势显得尤为重要。该方法可以用来对深井开采岩爆灾害预警。

结 语

结合现场开采技术条件,基于微震监测系统,利用非线性理论对微震监测数据进行了预警研究,得出如下结论:

(1) 提出了微震监测系统优化设计需要考虑的因素, 主要有: 监测对象、监测范围、监测背景环境、监测目的、设备投资成本和系统定位精度六大因素; 根据现场工程及地质条件, 依据主要考虑的因素, 优化了微震监测系统布置方案; 构建了实时、连续、数字型、信息化 24 通道微震监测系统, 为国内复杂条件下深部矿床开采岩爆灾害预警和安全管理提供了技术研究平台。

(2) 对该微震监测系统进行定位精度敏感度分析, 通过 3 次人工震源定位测试, 测得其定位精度最大误差为 8.804m, 最小仅为 0.315m。因此, 微震监测系统传感器阵列网络布置合理, 能够保证监测数据的真实性和可靠性。

(3) 利用正切模量变化来实现深井开采岩爆灾害预警。岩体受力经过弹性阶段后, 正切模量在进入屈服点 (B 点) 后出现下降。提出正切模量值进入弹性阶段后的下降点为预警关键点。

(4) 基于室内试验和微震监测数据, 岩体受力压密阶段, 低震级和低能量微震事件表现活跃, 进入弹性阶段后, 微震事件在屈服点后表现为高能量高震级事件, 指出微震事件活动率下降进入相对平静期点为预警关键点; 提出岩体动力失稳与微震事件活动率降低及视体积增加之间的关系是充分不必要条件。

(5) 分析了建立深井开采地压灾害预警模型需要满足的条件, 运用灰色预测理论, 对一段时间内微震事件参数进行预测分析。建立了非等间隔 $GM(1,1)$ 模型, 结合现场监测数据发现, 利用该模型进行短期预测, 预测值和实测值吻合较好。

(6) 基于微震事件参数, 分析了同一时间域不同震级微震事件空间分布规律和同一空间域微震事件时间分布规律, 得出了微震事件在空间分布上具有成带性、丛集性和间断性特征, 在时间分布上具有平稳性、续发性和间歇性特征。

(7) 分析了微震事件的位移、视应力变化与岩体破裂发生特征。在分析微震事件活动率的基础上,得出微震事件聚集增加、视体积剧增和微震事件活动率增加,是岩体裂纹从扩展到贯通的过程特征,可以为岩爆灾害预警提供参考。

(8) 发展了基于地震学参数的岩爆灾害预警新模式。利用岩爆灾害诱发微震事件 b 值变化规律,结合现场采场垮冒,推导出微震活动性参数 b 值和分形容量维 D_f 关系为 $D_f = 2b$ 。随着开采扰动的变化,岩体局部产生应力集中、裂纹萌生和扩展, D_f 值表现为增加或平静,这表明随着分形维数的增大,岩石断裂面的粗糙度增加,但不发生采场岩爆灾害;当 D_f 值急剧下降时,表明岩体裂纹的粗糙度在降低,采场容易发生岩爆灾害,形成岩体失稳破坏;当岩体发生破坏后, D_f 值表现为增加或相对平静;结合现场实践分析发现, D_f 值减小,发生岩体破坏的概率增加;反之,发生岩体破坏的概率减小。

基于灰色-突变理论的岩爆预测模型

岩爆是一个相当复杂的过程，其发展演化过程中伴随的微震活动也表现出高度的不连续性，在某一条条件下，相应的监测数据会发生急剧变化，具有明显的突变特征。因此，要对它的力学行为进行预测和控制，有必要借助非线性理论。突变理论是研究不连续现象的一种数学方法，它是研究跳跃式失稳现象的有效工具。突变理论的一个显著优点是，即使在不知道系统有哪些微分方程，更不用说如何解这些微分方程的条件下，仅在少数几个假设的基础上，用少数几个控制变量便可预测系统的诸多定性或定量状态。

用突变理论方法研究问题，主要是通过建立系统的总势能函数来进行的。对于基于监测数据时间序列来进行系统突变分析的情况，其一般是通过数据时间序列进行定性拟合来构建系统的势函数。由于地下条件的复杂性，监测数据往往表现出较强的随机性，灰色建模理论对原始随机序列采用“生成”的信息处理方法，可以弱化其随机性，增强其确定性信息，实现对原数据的精确拟合^[126]。因此，将突变理论与灰色建模理论相结合，建立岩爆的灰色-突变预测模型，可以发挥两种理论各自的优势，提高岩爆预测的精度。

6.1 微震活动时间序列分析

微震是矿岩变形、裂纹扩展过程中引起的伴生现象,它与矿岩的力学行为有着密切的相关性。因此,微震信号中包含了大量关于围岩受力破坏以及地质缺陷活化过程的有用信息。微震监测研究的主要目的就是通过对井下的硬件设施接收地震波,然后利用各种分析软件从地震波形中提取有用信息,并用一些量化的地震学参数(主要用于表征岩石应力、应变的动态演变和围岩的最终破坏)来对这些信息进行表征。

会泽铅锌矿 ISS 微震监测系统可以实现对多种定量地震参数的快速计算,使之应用于日常岩爆预测,例如,事件数 N 、微震能量 E 、震级 M 、能量指数 EI 、地震视体积 V_A 、地震黏度 V_s 、地震扩散率和地震 Schmidt 数、地震刚度等。研究这些参数在空间和时间上的分布及变化,可掌握岩体破坏的演化规律,达到预测预报的目的。但是,目前关于这些参数时间序列在矿山地震预测中成功应用的报道主要体现在个别事例上^[127,128]。因此,有必要通过对微震监测参数时间序列曲线与井下岩爆实例的响应规律进行分析,研究岩爆的前兆特征,进而实现对岩爆的准确、快速预报。

1499m 中段在 2007 年 11 月 1 日~12 月 31 日之间的井下岩爆记录如表 6-1 所示。根据记录,11 月和 12 月两个月间 1499m 中段共监测到微震事件 343 个,具有破坏性的岩爆记录 3 起。利用 ISS 系统的后台处理软件对此区域内监测到的微震信息进行快速计算,最终得到一系列的震源参数及其时间序列曲线,以下分别对几种主要参数在此期间的变化特征进行分析。

表 6-1 1499m 中段岩爆记录

序号	时 间	位 置	垮冒量/t	坐标(x, y, z)
1	2007-11-20 夜班	1499 分段 15 分层 3 号盘区	100	(9610, 6130, 1499)
2	2007-12-07 夜班	1499 中段 15 分层 7 号矿房	150	(9640, 6140, 1499)
3	2007-12-13 白班	1499 分段 1 号盘区 3 号矿房	100	(9620, 6200, 1499)

(1) 微震能量 E 及地震矩 M 。把微震活动定义为出现于一定体积 ΔV 和一定时间 Δt 内的许多微震事件。使用下列 4 个很大程度上是独立的量可以对地震活动进行量化：①事件间的平均时间 \bar{t} ；②相邻事件之间的平均距离（包括震源大小） \bar{d} ；③地震矩的和 ΣM ；④发射能量的和 ΣE 。基于这 4 个基本参数，可以推得许多其他的地震活动参数。地震矩 M 是地震震源定量描述的基本力学参数，主要是作为地震大小的度量^[55]。

(2) 微震事件数 N 时间序列。根据损伤力学，岩石破裂是由于其内部损伤不断产生、扩展直至贯通破裂的过程。如果将一个微破裂的产生看做是一个微震事件，则事件数 N 必定与矿岩力学行为的演化过程有着直接联系。

在 ISS 微震监测系统中，微震事件数常表示为事件活动率 ACT（即单位时间里的微震次数，一般以天为单位）和累计值 CNE 的形式。如图 6-1 所示是 11 月和 12 月两个月间微震事件的微震活动率 ACT 的时间曲线和累计视体积曲线。由图可知，11 月份内微震活动较均匀，虽出现过几次峰值，但总体来说事件量较少，且震级较低，如 11 月 22 日岩爆记录对应的主破裂微震事件 M_L 仅为 0.4。而 12 月份的微震活动相对而言较为频繁，尤其是在 12 月 15 日附近，事件数突然增大，到达本时段内的最大值 40，同时出现一个较严重的破坏事件（ $M_L = 0.8$ ，现场岩石垮冒

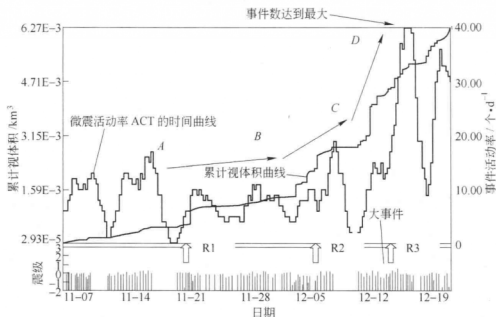


图 6-1 微震活动率时间序列曲线

量为 100t)。

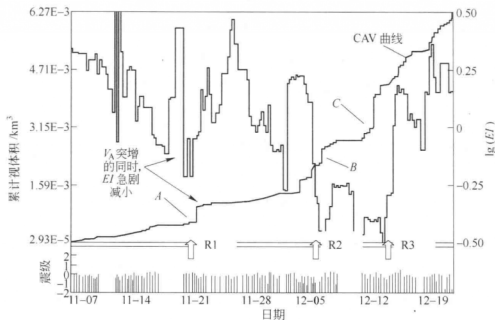
微震事件数 N 在时间上的分布规律反映了此区域岩体内裂隙压缩、扩张直至宏观破裂发生岩爆的整个过程。通过观察，可以将其分为三个阶段，如图 6-1 所示：AB 段，此阶段内微震活动较低，说明开采活动引起局部应力集中，导致岩体受载引起其内部预存裂隙的闭合，产生少量的微震事件，岩体处于稳定状态。BC 段，该阶段微震发生数基本上呈稳定增长，随着应力增加，岩体内部开始生成新的裂隙，微震活动开始明显增加，但此时微裂隙呈稳定状态发展，BC 其实对应岩体的纯弹性变形阶段。CD 段，AE 数急剧增长，并最终达到区域峰值。这表明岩体内的微裂隙扩展、贯通，并最终形成宏观破裂，导致岩体破坏。井下岩爆发生的实际情况表明，微震事件数 N 在岩爆发生前急剧增加。

(3) 累计视体积 V_A 。视体积是衡量震源体积（岩体内发生

同震非弹性变形的体积)大小的标量。根据损伤理论,岩体受载后其内部将产生大量的微裂隙,由于裂隙张开占据岩石空间而导致岩石体积膨胀,这种现象谓之扩容现象^[129]。岩石的扩容性与围压效应有关,围压越大则扩容值越低。一般岩石开始扩容的应力水平为宏观破裂应力的 $1/3 \sim 2/3$, 在接近峰值强度时,岩石进入快速扩容阶段。因此,视体积的突然增大可以作为岩爆的前兆特征。

在 ISS 系统中,视体积的变化情况由累计视体积 ΣV_A 与时间的关系曲线 CAV 表示,如图 6-2 所示。由图可知,CAV 曲线在 2007 年 11 ~ 12 月间共有三次突增点,如图中 A、B、C 三点所示,其与井下岩爆的实际发生时间基本对应,R1、R2、R3 依次为表 6-1 中记录的三次岩爆事件。以 R3 岩爆为例,监测资料显示,圈定区域岩体的视体积 V_A 在 12 月 12 日附近突然变大,由 $3.15E-3$ 激增到 $4.19E-3$ 。对照井下采掘计划,该时间段内,正在对 1499m 分段 1 号盘区 3 号矿房进行回采,采场情况为该盘区 3 号矿房正在进行回采,而 2 号矿房已回采结束,但还未来得及充填,这就使得它们之间的 2 号矿柱应力集中。矿柱处于单轴受压状态,其内部产生大量的微裂隙,出现扩容现象,到一定程度时,岩体破裂,体积急剧增大,于是导致图 6-2 中累计视体积的突增。

(4) 能量指数 EI 。地震事件的能量指数 EI 是该事件发射的地震能量与同矩地震事件发射的平均能量之比^[55]。由于视应力 $\sigma_A = \mu E/M$, 则具有相同 M 的地震事件,其发射的能量越大则说明事件震源的 σ_A 越大。而 $EI = E/E(M)$, 故 σ_A 与 EI 具有一致性,某区域的能量指数越大,则说明该区域的应力越高。因此,可以根据 EI 的变化情况来研究圈定范围岩体的应力分布。由岩石

图 6-2 累计视体积 V_A 及能量指数 EI 的时间序列曲线

力学理论, 岩石在接近破坏时, 变形增长加快而应力增长减小; 在峰值后区, 应力随变形的增大而下降。根据岩石的失稳理论, 岩石破坏后区岩石发生应变软化, 应力下降越快, 岩石失稳破坏越严重。因此, 能量指数出现下降预示着岩体的不稳定性增加。同时, 视体积的突然增加与能量指数急剧减小可以作为岩爆的前兆特征, 如图 6-2 所示。

(5) Schmidt 数。地震黏度与扩散率之比称为施密特数 (Schmidt 数), 其测量的是岩体地震流的湍流程度, 描述了岩体地震流变化的时空复杂性, 施密特数越低, 湍流程度越高, 流动的稳定性较差。Schmidt 数的计算公式^[55]如下:

$$Sc(\Delta V, \Delta t) = \frac{\nu_s}{d_s} = \frac{4\mu^2 \Delta V \Delta t (\bar{t}) \sum_{t_1}^{t_2} E}{\rho(\bar{X})^2 \left(\sum_{t_1}^{t_2} M_{ij} \right)^2}$$

在 ISS 系统中, Schmidt 数以其对数形式 $\lg Sc$ 来表示, 如图 6-3 所示, 在三次岩爆事件附近, $\lg Sc$ 均处于较低水平, 这表明岩体的稳定性较差, 破坏的可能性大。

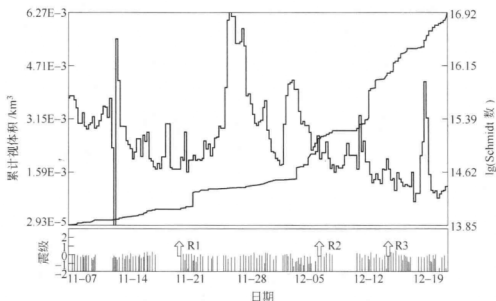


图 6-3 Schmidt 数时间序列曲线

基于微震监测数据, 结合井下岩爆实例, 对岩爆发生过程中监测数据的变化特征进行研究发现, 岩爆发生前会出现事件数 N 、视体积 V_A 、微震能量 E 突然增大, 能量指数 EI 急剧减小的现象。这些微震的突然释放现象成为岩爆发生明显的前兆特征, 可以用其来对岩爆进行预测。

6.2 微震监测数据的尖点突变分析

6.2.1 突变理论

突变理论是 20 世纪 70 年代发展起来的一门新的数学学科, 它是非线性科学的一部分, 专门研究不连续现象。一种自然现象

在发展变化过程中常常会从一个状态跳跃式的变到另一个状态，这就是所谓的突变。例如，一定质量的气体在一定温度和压力之下会变成液体，天气的突然变化会产生暴风雨，地壳的剧烈运动会引起地震，等等。以前科学家们在研究这类突变现象时遇到了各式各样的困难，其中主要困难之一是缺乏恰当的数学工具来描述他们的数学模型。1969 年法国数学家 R·托姆在题为《生物学中的拓扑模型》一文中，首次在奇点分类的基础上提出了一个描述突变现象的数学模型。稍后，他在名著《结构稳定与形态发生》一书中又系统地阐述了他的思想，这就是人们现在所称的突变理论^[130]。

6.2.1.1 突变理论分类

按照托姆突变理论的分类定理，自然界和人类社会中的大量不连续现象，可以由某些特定的几何形状来表示。一般情况下，我们所接触的突变现象都是发生在三维空间和一维时间的四个因子控制下的形形色色的初等突变，概括起来只有 7 种类型。这 7 种类型的初等突变各自分别由一个势能函数决定，它们分别为：折叠突变、尖点突变、燕尾突变、椭圆脐点突变、双曲脐点突变、蝴蝶突变、抛物脐点突变^[131]。各势函数如表 6-2 所示。

表 6-2 初等突变类型

突变模型名称	势 函 数
折叠突变	$V(x) = x^3 + ux$
尖点突变	$V(x) = x^4 + ux^2 + vx$
燕尾突变	$V(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$
椭圆脐点突变	$V(x, y) = \left(\frac{1}{3}\right)x^3 - xy^2 + w(x^2 + y^2) - ux + vy$

续表 6-2

突变模型名称	势 函 数
双曲脐点突变	$V(x, y) = x^3 + y^3 + uxy - ux + vy$
蝴蝶突变	$V(x) = x^6 + tx^4 + ux^3 + vx^2 + wx$
抛物脐点突变	$V(x, y) = y^4 + x^2y + uxy^2 + ty^2 - ux - vy$

6.2.1.2 应用方式概述

突变理论的应用方式大致可分为两类：

(1) 定量描述，主要适用于数、理、化等“硬”科学。其方法是寻找一个势函数，与势函数相类似的函数或与某一突变流形或分叉集有相同数学描述的系统，应用适当的数学手段或技巧，将其归结为分类表（见表 6-2）中的某一类型。此类应用不仅能加深已有的认识，从较高的角度来统一处理问题，而且往往能导致一些新的结果。

(2) 定性分析，主要适用于生物、社会等“软”科学。即由观察到的特征现象如跳跃、滞后等设想一个初等突变模型，然后作数据拟合，看这个数学模型能否用来很好地解释观察到的现象，最后受其启发而推断现象的机理，导出一个物理模型。此类应用可使许多原来难以或无法做数学处理的问题得到一种有效的数学手段^[132]。

6.2.1.3 突变理论在岩石力学中的应用

自 1983 年凌复华的中译本《突变理论入门》将突变理论引入我国以来，经过我国科技人员的努力，突变理论在岩石力学研究领域已经有了较为广泛的应用。施泽进等人研究了断层活动的

突发机制并建立了断层活动的尖点突变模型。秦四清等人将突变理论应用于岩体力学工程中,建立了岩体失稳的尖点突变模型,提出了刚度判定准则,并进一步建立了岩体统一失稳理论。黄润秋等人建立了反倾斜坡弯曲拉裂的尖点突变模型,并进一步提出了斜坡失稳条件。刘军等人综合考虑地下水的影响,建立了一个新的岩体失稳尖点突变模型^[133]。在岩爆方面,潘岳、谭云亮、尹光志、潘一山等人建立了岩体结构失稳的突变模型,对围岩压力、刚度和煤岩损伤扩展耗散能量进行分析,定性地解释发生冲击地压的机理^[134]。徐曾和等人利用尖点突变理论对柱式岩爆进行了研究^[135]。单晓云等人用突变理论预测了巷道岩爆发生的可能性^[136]。这些研究成果为突变理论的深入研究与应用奠定了坚实的基础。

6.2.2 尖点突变模型及稳定判据

目前,突变理论在岩石力学中的应用已较为广泛,其中当具有两个控制变量时,最简单的突变模型为尖点突变。由于其比较简单,临界面也容易构造,且几何直观性强,故属于应用最广泛的突变模型。尖点突变模型势函数的标准形式为

$$V(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ux^2 + vx \quad (6-1)$$

式中 x ——状态变量;

u, v ——两个控制变量。

该势函数的临界点为方程 $V'(x) = 0$ 的解,故平衡曲面的 M 由该方程给出,即

$$V'(x) = x^3 + ux + v = 0 \quad (6-2)$$

分歧点集满足方程

$$V''(x) = 3x^2 + u = 0 \quad (6-3)$$

平衡曲面的折痕在 $u-v$ 控制平面上的投影称之为分歧点集，它是所有使状态变量 x 产生突跳即突变的点的集合，因它是 M 的一个子集，由式 (6-2) 及式 (6-3) 消去状态变量 x ，得到分叉点集 B 满足方程

$$\Delta = 8u^3 + 27v^2 \quad (6-4)$$

下面以图示的方法来对这些概念进行解释。将平衡曲面 M 绘出，如图 6-4 所示，其为一个有褶皱的曲面。从图中可见曲面上有一个平滑的折叠，折叠越向后越窄，最后交汇于三层曲面汇合处 G' 点，其中 A' 、 E' 、 G' 、 C' 构成的层面称为上叶， G' 、 E' 、 F' 构成的层面称为中叶， B' 、 E' 、 G' 、 D' 构成的层面称为下叶。在状态曲面的上、中、下三叶上，上叶和下叶是稳定的，中叶是不稳定的，表示控制变量在这一区域内的微小变化可导致状态变量

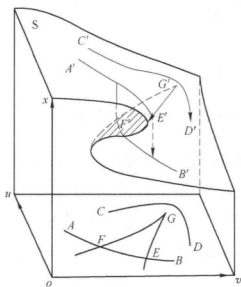


图 6-4 尖点突变模型

的急剧变化。如果把折叠区投影在控制平面上,可以得到一个尖角形区域 EFG , 它的顶端是尖的, 故被命名为尖点型突变。折叠区的边界在控制平面上的投影为两条曲线 GE 和 CF , 它们是突变点集。在曲线范围以内为突变区, 曲线范围以外的两边为稳定区。

当系统在控制变量 u 、 v 作用下沿 AB 方向变化时, 系统状态从点 A' 到点 E' , 是在折叠区的上叶连续的变化, 属于渐变过程。到了折叠的边界点以后, 只要控制变量 u 、 v 沿 AB 方向离开 E 点, 则系统状态在 E' 点就会突然下跳到状态曲面的下叶, 从而发生不连续的变化, 即发生一次突变。反之, 如果控制变量沿着相反的方向变化, 系统状态在曲面下沿 BF 方向是连续变化的, 但到了折叠的边界点 F' , 稳定的连续曲面中断了, 系统状态突然上升到状态曲面的上叶, 从而发生不连续的变化, 这又是一次突变。可见系统的变化形式、路径及处于那一种状态完全由控制变量 u 、 v 的值决定。如果控制变量沿 CD 曲线变化, 绕过了尖角形的折叠区, 状态曲面上的点就会沿 $C'D'$ 发生平滑连续的变化而不会产生突变。因此, 系统要发生突变, 其变化路径在控制平面上必须跨越分叉集 EFG , 即必须有 $4u^3 + 27v^2 < 0$ 。

6.2.3 尖点突变模型模拟岩爆过程的可行性

岩爆过程中始终伴随着微震活动。因此, 微震信号中包含了大量岩体性状变化的信息, 而这种变化过程是由监测数据的时间序列来直接体现的。对监测数据在岩爆过程分布特征的研究发现, 累计事件数 N 及累积能量 ΣE 等参数的时间变化过程基本可以分为三个阶段:

(1) 平静期。岩体在受载初期, 外部载荷较低, 岩石内部出

现少量损伤,微地震活动性较低,岩石处于稳定状态。

(2) 稳定增长期。随着外部应力的继续增加,岩体内部微破裂增多,事件数及释放的应变能明显增加,同时随着破坏范围的不断扩大,微震活动性相应升高。

(3) 破坏期。当应力达到一定条件时,岩石的局部损伤最终导致宏观破裂,微震活动急剧增加。如图 6-5 所示,虚线之间标注的曲线段表示某岩爆事件前微震视体积累计值 ΣV_A 的变化情况。由图可知,视体积累计值在时间上经历了由平稳变化到突然增加的过程,并具有明显的拐点 B 。将 B 点之前的 AB 阶段看做是尖点突变模型中系统的稳定状态,而其后的 BC 阶段即对应的是不稳定状态,应力等外部因素的微小变化使系统在临界点 B 产生突跳,最终岩爆产生。因此,可以基于监测数据,运用尖点模型来模拟岩爆由孕育到发生的中间过程。

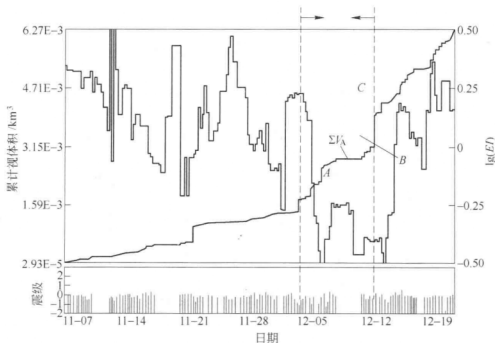


图 6-5 某岩爆事件前微震累计视体积的变化特征

6.2.4 监测数据的尖点突变分析

前述研究表明,可以利用尖点突变模型来模拟岩爆的演化过程,而岩爆过程中的微震监测数据又是其压缩变形、损伤演化的直接体现,因此,可以通过监测数据的时间序列来构建系统的势函数。

令监测数据序列与时间存在函数关系 $y(t)$, 由于任何单变量的函数都可按泰勒公式展开, 则有

$$y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \cdots + a_n t^n + \cdots \quad (6-5)$$

实际分析发现,对具有一定趋势规律的序列过程,截取到第4项,精度已经足够,因此式(6-5)可近似表示为

$$y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \quad (6-6)$$

令 $t = z - n$, 代入式(6-6), 则有

$$y(z) = b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + b_3 z^3 + b_4 z^4$$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n^4 & -n^3 & n^2 & -n & 1 \\ -4n^3 & 3n^2 & -2n & 1 & 0 \\ 6n^2 & -3n & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -3n & 0 & 0 & -3n \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} \quad (6-7)$$

为将式(6-7)变换为尖点突变的势函数形式, 则

$$b_3 = a_3 - 4na_4 \stackrel{>0}{=} 0 \rightarrow n = \frac{a_3}{4a_4}$$

$$\text{再令 } z = \sqrt[4]{\frac{1}{4b_4}}x, b_4 > 0 \text{ 或 } z = \sqrt[4]{\frac{1}{-4b_4}}x \quad b_4 < 0$$

则式 (6-7) 进一步变换为

$$y = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ux^2 + vx + c \quad (6-8)$$

式中, u, v 分别满足

$$u = \begin{cases} \frac{b_2}{\sqrt{b_4}} & b_4 > 0 \\ \frac{b_2}{\sqrt{-b_4}} & b_4 < 0 \end{cases} \quad (6-9)$$

$$v = \begin{cases} \frac{b_1}{\sqrt[4]{4b_4}} & b_4 > 0 \\ \frac{b_1}{\sqrt[4]{-4b_4}} & b_4 < 0 \end{cases} \quad (6-10)$$

式 (6-8) 即为以 x 为状态变量, u, v 为控制变量的尖点突变模型。其中 y 表示岩爆过程中微震活动的某一参量, x 为距初始观测的时间, u, v 则为反映岩爆过程同微地震活动之间联系的参数, c 为常数, 对于突变分析没有意义, 可舍去。由尖点突变的失稳判据可知, 当 $\Delta = 4u^3 + 27v^2 \leq 0$ 时, u, v 的微小变化将引起系统状态的突跳, 即岩爆的发生。因此岩爆是否发生的判据为

$$\left. \begin{aligned} \Delta = 4u^3 + 27v^2 &\leq 0 && \text{岩爆发生} \\ \Delta = 4u^3 + 27v^2 &> 0 && \text{岩爆不发生} \end{aligned} \right\} \quad (6-11)$$

6.3 基于灰色建模理论的岩爆模型

对事物应用突变理论时,最关键的即是构建系统的势函数。其最重要的一种方法就是定性拟合,在这里即是通过监测数据时间序列的拟合来建立岩爆过程的数学模型。由于各种因素的影响,监测序列具有较强的离散性,直接拟合具有较大的误差,为提高精度,可利用灰色建模理论对原始数列进行处理,弱化其随机性,增强其确定性信息,从而构建准确的岩爆数学模型。

6.3.1 GM(1,1) 模型原理

灰色系统模型是揭示系统内部事物连续发展变化过程的模型,所以灰色系统模型一般用微分方程来描述,其中最典型的是 GM(1,1) 模型,下面介绍其建模原理^[137]。

定义 1 设 $X^{(0)}$ 为非负序列:

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$$

$X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的一阶累加生成序列:

$$X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)]$$

其中 $x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (k = 2, 3, \dots, n)$$

称 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 为 GM(1,1) 模型的原始形式。

定义 2 设 $X^{(0)}$ 、 $X^{(1)}$ 如定义 1 所示, $Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列:

$$Z^{(1)} = [z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)]$$

其中 $z^{(1)}(k) = 0.5[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)]$ ($k = 2, 3, \dots, n$)

称 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 为 $GM(1,1)$ 模型的基本形式。

定义3 设 $X^{(0)}$ 为非负序列:

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$$

$X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的一阶累加生成序列:

$$X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)]$$

其中 $x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (k = 2, 3, \dots, n)$$

$Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列:

$$Z^{(1)} = [z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)]$$

若 $\Phi = [a, b]^T$ 为参数列, 且

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T$$

则 $GM(1,1)$ 模型 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 的最小二乘法估计参数列

满足 $\hat{\Phi} = [B^T B]^{-1} B^T Y$ 。

定义4 设 $X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)]$ 为非负序列, $X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的一阶累加生成序列, $Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列,

$$[a, b]^T = [B^T B]^{-1} B^T Y$$

则称
$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$$

为 $GM(1,1)$ 模型 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 的白化方程, 也叫影子方程。

定义5 设 B 、 Y 、 $\hat{\Phi}$ 如定义所述, $\hat{\Phi} = [a, b]^T = [B^T B]^{-1} B^T Y$, 则

(1) 白化方程 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$ 的解为

$$x^{(1)}(t) = \left[x^{(1)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a}$$

(2) $GM(1,1)$ 模型 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 的解为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n)$$

(3) 还原值为

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k+1) &= \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \\ &= (1 + e^a) \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

6.3.2 微震监测数据的灰色建模

根据以上定义, 利用灰色建模理论对监测数据进行处理的步骤如下:

(1) 以天为单位时间, 对监测数据进行统计, 得到事件率 N (个/天)、能量 $E(\lg(J)/天)$ 等参数的时间序列:

$$\mathbf{X}^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \cdots, x^{(0)}(n)] \quad (6-12)$$

(2) 对数据序列进行累加处理, 得到 $GM(1,1)$ 模型的原始形式:

$$\mathbf{X}^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \cdots, x^{(1)}(n)] \quad (6-13)$$

(3) 由一阶累加生成序列 $\mathbf{X}^{(1)}$ 建立 $GM(1,1)$ 模型, 得到对应的白化微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (6-14)$$

$\hat{\Phi} = [a, b]^T = [B^T B]^{-1} B^T Y$, 根据定义 3 确定 B 、 Y 的值, 即可计算出发展系数 a 及灰色作用量 b 的值。

(4) 由初始条件 $\hat{x}^{(1)}(1) = x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$, 可得到累积生成数据序列:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (k = 1, 2, 3, \cdots, n) \quad (6-15)$$

(5) 由初始条件 $\hat{x}^{(1)}(1) = x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$, 可得到生成数据序列模型:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1) \quad (k = 2, 3, \cdots, n)$$

即
$$\hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}(k-1)} \quad (k = 2, 3, \cdots, n)$$

$$(6-16)$$

式 (6-16) 即为根据监测数据序列拟合而成的数学方程, 将其用泰勒公式展开则得式 (6-8), 然后按照 6.3.3 节中的方法作数学变换, 构建成尖点突变模型的势函数, 最终实现对监测数据进行突变分析的目的。

6.3.3 模型精度检验

灰色模型 $GM(1,1)$ 的精度一般用“残值大小检验法”、“均方差比值检验法”、“灰关联度检验法”及“小误差概率法”等进行技术精度检验。常用的检验方法为前面两种^[137]。

6.3.3.1 残值大小检验法

残差序列:

$$\varepsilon^{(0)} = [\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(n)]$$

其中 $\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)$

相对误差序列:

$$\Lambda = \{\Delta_k\}_1^n = \left\{ \left| \frac{\varepsilon_1}{x^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\varepsilon_2}{x^{(0)}(2)} \right|, \dots, \left| \frac{\varepsilon_n}{x^{(0)}(n)} \right| \right\} \quad (6-17)$$

平均相对误差:

$$\bar{\Lambda} = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta_k}{n-1} 100\%$$

令 P 为精度, $P = (1 - \bar{\Lambda}) \times 100\%$ 。

6.3.3.2 均方差比值检验法

均方差比值 C :

$$C = \frac{\sqrt{S_2}}{\sqrt{S_1}} \quad (6-18)$$

其中

$$S_1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2, \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k)$$

$$S_2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}]^2, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(k)$$

关于 C 和 P 的精度等级按表 6-3 来判断。

表 6-3 模型精度等级

C	<0.35	<0.5	<0.65	≥ 0.65
P	>0.95	>0.80	>0.70	≤ 0.70
精度等级	一级 (好)	二级 (合格)	三级 (勉强)	四级 (不合格)

6.4 利用灰色-突变模型预测岩爆的一般步骤

对以上研究内容进行归纳, 基于监测数据, 利用灰色-突变理论预测岩爆的一般步骤如图 6-6 所示。

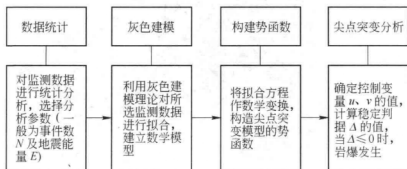


图 6-6 利用灰色-突变理论预测岩爆的一般步骤

6.5 模型应用实例

基于会泽铅锌矿井下某区域微地震活动监测数据的统计分析,运用建立的灰色-突变模型对其微震能量累积值 ΣE 的时间序列进行研究,成功预测到一次破坏性岩爆的发生。结果显示,该模型有较强的实用性。

6.5.1 微震活动实测

6.5.1.1 微震活动数据

根据监测系统监测,在研究时间段内,1499m 分段 1 盘区附近微震活动频发,如图 6-7 所示;共收集到微震事件 90 余个,详细数据如表 6-4 所示;以天为时间尺度对微震能量 E 进行统计,得到其累计值的时间序列,如表 6-5 所示。

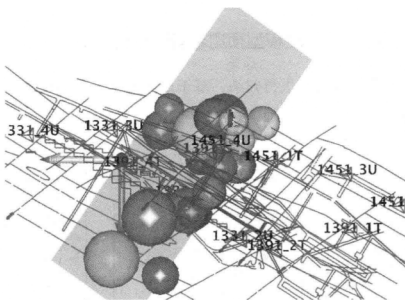


图 6-7 微震事件在 1499m 分段 1 盘区集聚情况

表 6-4 系统监测数据

日 期	触发时间	里氏震级 M_L	地震矩 $M/N \cdot m$	应变能 E/kJ	视体积 V_A/m^3
2007-11-28	12: 09: 35	-0.2	8.9	3.3	11.2
	21: 38: 12	0.0	9.0	3.9	8.3
2007-11-29	13: 09: 51	-0.1	8.7	3.7	6.2
	13: 09: 56	-1.1	7.9	1.3	10.4
	19: 05: 50	-0.1	8.7	3.9	5.2
2007-11-30	12: 30: 10	-0.7	8.6	1.6	25.9
	19: 22: 16	-0.7	8.3	2.1	11.3
	19: 22: 18	-0.4	8.8	2.8	13.1
	19: 22: 20	-0.2	8.9	3.1	13.2
	19: 58: 42	-0.8	8.7	1.1	43.9
2007-12-01	14: 57: 34	0	8.9	3.7	7.7
	14: 57: 42	-0.5	8.4	2.6	8
	20: 59: 45	0	9	3.8	8.3
2007-12-02	03: 07: 20	-0.4	8.5	2.9	8
	03: 07: 27	-0.8	7.9	2.5	4.2
	04: 49: 12	-0.1	8.8	3.6	7.2
	18: 44: 22	-0.2	8.8	3.4	8
	19: 03: 05	-1	7.8	1.7	6.6
2007-12-03	03: 01: 53	-0.9	8.0	2.1	6.5
	03: 30: 51	-0.7	8.0	2.6	4.9
	04: 33: 06	0.2	9.4	4.2	11.4
	04: 33: 13	-0.4	8.6	3.0	8.3

续表 6-4

日 期	触发时间	里氏震级 M_L	地震矩 $M/N \cdot m$	应变能 E/kJ	视体积 V_A/m^3
2007-12-03	04: 33: 13	-0.3	8.8	2.8	13.8
	12: 42: 56	-0.4	8.5	2.9	8.3
	19: 48: 52	0	9.1	3.7	10.5
2007-12-04	03: 09: 13	-0.1	8.9	3.4	10.4
	03: 09: 38	-0.4	8.6	3	8.9
	03: 09: 45	-0.7	8.3	2.3	8.9
	03: 09: 47	-0.6	8.4	2.4	10.2
	11: 10: 22	-1	7.7	1.9	4.8
	12: 36: 57	-0.4	8.7	2.7	11.9
	13: 30: 15	0.1	9.2	3.7	11.9
	13: 30: 15	0.3	9.6	4.1	16.6
	13: 30: 21	-0.1	9	3.4	12
	18: 40: 23	0.2	9.5	3.9	16.2
	19: 17: 56	-0.1	9	3.4	12.4
2007-12-05	02: 15: 58	-0.4	8.5	3	7.5
	02: 16: 07	-0.9	8	1.7	9.2
	03: 04: 31	-0.1	9.2	3.3	15.8
	11: 48: 49	-0.9	7.9	2.1	6
	12: 26: 47	-0.5	8.8	2.4	18.1
	12: 26: 50	-0.6	8.3	2.5	8.2
	19: 08: 20	-0.1	8.9	3.7	7.8
	19: 08: 24	-0.9	8	1.9	8.3

续表 6-4

日 期	触发时间	里氏震级 M_L	地震矩 $M/N \cdot m$	应变能 E/kJ	视体积 V_A/m^3
2007-12-06	03: 01: 42	0.1	9.1	3.9	9.6
	05: 07: 01	-0.1	8.8	3.6	7.4
	12: 43: 44	0.2	9.3	4	12.1
	12: 43: 46	-0.9	7.8	2.2	4.6
	18: 56: 05	-0.4	8.5	2.9	8.1
2007-12-07	02: 23: 13	-0.8	8.2	2.2	8.4
	03: 10: 20	-0.4	8.7	2.7	13.1
	03: 10: 23	-0.5	8.6	2.6	12.1
	05: 11: 25	-0.5	8.3	2.9	6.2
	11: 25: 23	-0.6	8.4	2.6	8.1
	11: 25: 26	-1	7.9	1.6	8.7
	11: 25: 28	-0.8	8.1	2.1	7.8
	11: 25: 29	-1	7.9	1.9	6.6
	13: 26: 09	-0.6	8.3	2.7	6.8
	19: 16: 03	-0.1	9.1	3.4	14.7
	19: 16: 06	-0.3	8.9	2.9	16.4
	19: 16: 08	-0.3	8.8	3.1	11.1
	19: 44: 47	-0.1	8.8	3.7	6.6
	19: 44: 48	-0.5	8.5	2.8	8.3
	19: 44: 52	-0.5	8.4	2.9	7.1
	20: 11: 24	-0.6	8.3	2.6	7.8
	23: 05: 17	-1.7	7.5	-0.4	23.1

表 6-5 微震能量累积值统计表

日 期	2007- 11-28	2007- 11-29	2007- 11-30	2007- 12-01	2007- 12-02	2007- 12-03	2007- 12-04	2007- 12-05	2007- 12-06
累积能量 $\Sigma E/\text{kJ}$	7.2	16.1	26.8	36.9	51	72.5	106.7	127.3	144.5

6.5.1.2 采场实际情况

对照井下采掘实况，微震事件集聚区为 1499m 分段 1 盘区，此时段该盘区 3 号矿房正在进行回采，而 2 号矿房已回采结束，但还未来得及充填，这使得它们之间的 2 号矿柱应力集中，如图 6-8 所示。

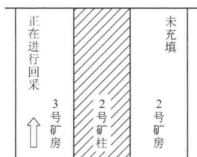


图 6-8 采场实际开采情况示意图

6.5.2 监测数据的灰色-突变分析

6.5.2.1 累积能量值时间序列灰色建模

根据累积能量值的前 7 个数据（即 2007 年 11 月 28 日 ~ 12 月 4 日）建立原始数据序列：

$$X^{(0)} = (7.2, 16.1, 26.8, 36.9, 51, 72.5, 106.7)$$

对其累加得

$$X^{(1)} = (7.2, 23.3, 50.1, 87, 138, 210.5, 317.2)$$

由定义 3 得

$$B = \begin{bmatrix} -15.25 & 1 \\ -36.7 & 1 \\ -68.55 & 1 \\ -112.5 & 1 \\ -174.25 & 1 \\ -317.2 & 1 \end{bmatrix} \quad Y = (16.1, 26.8, 36.9, 51, 72.5, 106.7)$$

由式 $\hat{\Phi} = [a, b]^T = [B^T B]^{-1} B^T Y$ 计算得

$$a = -0.356, \quad b = 11.87$$

则 $GM(1,1)$ 预测模型为

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k) &= (1 - e^{-0.356}) \left(7.2 - \frac{11.87}{-0.356} \right) e^{-(-0.356)(k-1)} \\ &= 8.49369 e^{0.356k} \end{aligned} \quad (6-19)$$

6.5.2.2 拟合精度检验

按照建立的模型对原数据进行模拟, 结果如表 6-6 所示。

表 6-6 模型拟合值与实际值对比

日期	2007-11-28	2007-11-29	2007-11-30	2007-12-01	2007-12-02	2007-12-03	2007-12-04
实际值	7.2	16.1	26.8	36.9	51	72.5	106.7
预测值	7.2	17.27	24.63	35.13	50.09	71.43	101.9

利用式 (6-17) 及式 (6-18) 对模型精度进行检验。

A 残值大小检验法

残差序列: $\epsilon^{(0)} = (0, -1.17, 2.17, 1.77, 0.91, 1.07, 4.8)$

相对误差序列: $\Lambda = (0, 0.0727, 0.0810, 0.0480, 0.0178, 0.0148, 0.0450)$

平均相对误差: $\bar{\Lambda} = 4.655\%$

精度: $P = 95.345\%$

B 均方差比值检验法

$S_1 = 32.2, S_2 = 3.0273, C = 9.4\%$

按照精度判别等级, 该模型精度为一级。

6.5.2.3 尖点突变分析

将式 (6-19) 按泰勒公式展开得

$$y(k) = 8.49369 + 3.024k + 0.538k^2 + 0.0639k^3 + 0.00568k^4$$

即 $(a_0 = 8.4937 \quad a_1 = 3.0240 \quad a_2 = 0.5380$

$$a_3 = 0.0639 \quad a_4 = 0.0057)$$

则 $(b_1 = -1.573 \quad b_2 = 0.269 \quad b_4 = 0.0057)$

$$(u = 3.563 \quad v = -21.70)$$

将 (u, v) 值代入式 (6-11) 得

$$\Delta = 4u^3 + 27v^2 = 12894.9 > 0$$

说明此段时间内系统处于稳定状态, 不会发生岩爆灾害。

按照相同的步骤对接下来的数据进行拟合, 求出 (u, v) 值代入预测判据进行计算, 每增加一个数据, 则计算一次, 如表 6-7

所示。当在 2007 年 12 月 6 日时, $\Delta = -55102.788 < 0$, 表明系统出现突变失稳, 与之相对应, 现场在 2007 年 12 月 7 日凌晨 5 点左右发生岩爆。

表 6-7 模型预测结果

时 间	u	v	Δ	预测岩爆发生情况
2007-12-04	3.563	21.7	12894.9	不发生
2007-12-05	-16.93	-40.5	24876.52	不发生
2007-12-06	-27.3	-31.2	-55102.79	发 生

结 语

针对破坏性岩爆发生前, 监测数据出现急剧变化的突变特征, 建立基于灰色-突变理论的岩爆预测模型, 并提出了岩爆发生的判据。结合现场实例, 利用灰色建模理论对某岩爆活动区内地震能量累积值序列进行了预测拟合, 同时, 应用尖点突变模型对拟合序列的突变性进行分析, 最终预测了某次岩爆的发生。

深井开采岩爆灾害工程控制研究

7.1 引言

深井开采岩爆灾害工程控制是一个复杂的系统问题。地下工程岩体开挖以后,破坏了原岩应力平衡状态,岩体应力重分布,产生次生应力场,使巷道或采场周边围岩体发生变形、滑移和破坏。为保证生产安全,必须对这种地压现象采取相应的控制措施。

研究表明^[138-144]:具有岩爆灾害倾向性的岩体,当应力达到一定的强度后,就有可能发生岩爆灾害。一般岩爆灾害的发生需要具备两个条件:开挖岩体周围采场应力重分布和岩体具有岩爆灾害倾向性。这两个条件是相互影响、相互依存的关系。一般认为,应力梯度越大,发生岩爆灾害的可能性就越大。因此,控制岩爆灾害发生的实用有效手段就是改变诱发条件、破坏开挖空间应力集中结构、减少受力岩体中弹性变形能的蓄积能力、减少其发生的可能性,甚至可以采取人为诱发岩体失稳破坏而使其应力、能量得到释放,以便减小其破坏性。国外矿山实践表明^[145-148]:在岩体开挖前和开挖过程中,实行工程控制分析,可以达到避免或减少岩爆灾害发生的目的。

工程控制分为工程主动控制和工程被动控制。工程主动控制是在预先分析各种风险因素及其导致目标偏离的可能性和程度的基础上,拟订和采取有针对性的预防措施,从而减少乃至避免岩爆灾害的发生。工程被动控制则是从计划的实际输出中发现偏差,通过对产生偏差原因的分析,研究制定纠偏措施,以使偏差得以纠正,工程实施恢复到原来的计划状态,或虽然不能恢复到计划状态但可以减少偏差的严重程度^[149]。对于深井开采岩爆灾害工程控制来讲,应该采用工程主动控制和工程被动控制相结合的手段,将工程主动控制与工程被动控制紧密结合起来,并力求加大工程主动控制在措施中的比例。

目前,我国采矿界受到研究经费等各方面因素的制约,采矿工程师对岩爆灾害控制技术的研究和设计还只停留在国内外同类矿山对比、经验公式计算、岩体条件假设和数值模拟分析上,而没有充分考虑岩爆灾害诱发条件、矿山岩体赋存状态和采取控制手段适用的外部环境因素,导致我国矿山开采岩爆灾害不正确的控制方式一经形成难以改变。岩爆灾害发生后,采取局部加固措施,不仅耗时、耗力、浪费成本,而且效果也有限。因此,有必要从岩爆灾害的工程主动控制和被动控制角度探索新的途径,为深井开采岩爆灾害控制提供新的思路。

本章所要研究的深井开采岩爆灾害工程控制流程如图 7-1 所示。

7.2 采矿工艺

云南驰宏锌锗股份有限公司会泽铅锌矿是我国乃至世界罕见的特富铅锌锗多金属矿床,矿体具有地质储量大、矿石品位高等特点,已探明金属储量 800 万吨,远景储量 1500 万吨,

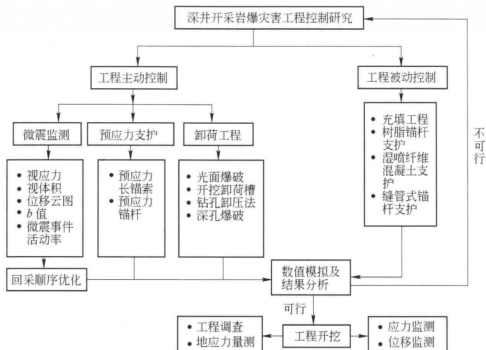


图 7-1 深井开采岩爆灾害工程控制流程

平均铅锌品位在 30% 以上，且富含锆、银、镉等多种稀贵金属。

会泽矿区深部 8 号矿体具有复杂的赋存条件，具有“水、深、碎、难”等特点，复杂程度之高在我国尚无先例。矿床开采技术条件、矿区地理环境的局限和环境保护的严格要求是矿山深部资源开发的关键技术难题，同时也是会泽矿区“深部资源综合开发、环保节能技改工程”实现预期目标和取得良好技术经济效益的基础。

本章主要对会泽铅锌矿 8 号矿体赋存条件、原岩应力、岩石力学参数及采矿工艺等方面进行详细分析，以便为微震监测系统的构建等方面的研究提供基本依据资料。

7.2.1 采矿方法

矿体顶底板围岩的稳固性对采矿方法选择有重要影响。8号 and 10号矿体底板为摆佐组白云岩,节理裂隙及小断层发育,破坏了其完整性。岩溶较发育,以溶孔及溶蚀裂隙为主,也影响了岩体的整体强度。总体上看,上盘岩层的稳定性为差-中等。矿体设计的采准工程多布置在下盘。从施工揭露的工程看,下盘岩层属于中等稳固。矿体顶板多为威灵组灰岩及白云质灰岩,部分矿体顶板为摆佐组白云岩。上盘岩层由于节理裂隙及小断层发育,切割岩体,破坏其完整性,加之岩体内节理含泥,影响了岩体的强度。总体上看,矿体顶板稳固性为差-中等。由于矿体的倾角一般为 60° 左右,故上盘岩层的稳固程度对采场的安全生产更为重要。根据矿体整体稳定条件、矿体赋存条件及6号和1号矿体上部回采情况,8号矿体设计采用机械化盘区上向进路分层充填法。

会泽铅锌矿8号矿体采用竖井+盲竖井开拓。矿区目前生产水平为1331m和1391m两个中段以上氧化矿回采,矿石由斜井提升至1751m水平,再经竖井提升至地表2538m后运至选矿厂。8号矿体采矿方法为上向水平分层充填法,由于8号矿体特点适合从下往上分层回采,分层回采结束后,采用膏体充填,然后进行上一分层回采与充填工作,人员与设备直接在矿体顶板下作业,因此,要求矿体顶板平整,必要时采用支护措施,防止发生冒顶和局部矿石冒落,确保工人作业安全。分层矿体崩落后直接落在充填体上,采用铲运机出矿。为减少矿石的损失和贫化,要求充填体具有较高的强度。

目前,矿山已经对8号矿体1331m、1391m两个中段进行了全面回采,从揭露的矿岩条件看,总体上属于中等稳固条件,局

部地段矿岩不稳固,采场发生多次冒顶事件。从采用的采矿方法看,原则上采用上向水平分层充填法,然后对矿体端部进行全断面回采,根据矿体稳定情况,采高4~8m,形成分段充填法。在矿体厚大部分,先将矿体进行盘区划分后,再进行矿房和矿柱划分,规格均为6m,第一步回采矿柱,采用膏体充填方式;第二步回采矿房,同样采用膏体充填方式。一步回采全部结束后,再进行二步回采。设计分层高度4m,矿体厚度小于10m的矿段,如果矿岩稳定条件具备,可以沿走向全断面回采;矿体厚大部分,为控制顶板暴露面积,可采用两步骤回采。上向水平分层充填法充填体可以接顶,也可以不完全接顶,但中段开采的最上面一个分层必须接顶。回采分层高度4m,每次充填高度3m,留1m空间作为上分层爆破的补偿空间。由于膏体基本上无需脱水,因而必须加水泥使其固化,参照前期对充填体试验研究成果,充填料的灰砂比主要为1:12(或1:16)。上部0.5m厚的充填料要求在短期内具有较高强度(3~4MPa),充填料的灰砂比为1:4(或1:6)。

沿走向将矿体分作2~3个盘区,盘区之间相对独立又相互制约,沿矿体下盘开掘沿脉到矿体端部,各盘区两端协调回采,在矿体厚大部分采用联合支柱形式支撑顶板,平常多采用锚杆支护进行顶板管理,局部地方采用立柱、垛木等支护形式,采用膏体充填方式处理采空区,充填水经采准道进入沉淀池→中段水仓→抽出地表。

7.2.2 采准工程布置

采准斜坡道采用“之”字形折返式。分段平巷每隔12m(垂高)布置一条斜坡道,离矿体5~8m,每块矿房和矿柱均形成独

立的出矿道。充分保证铲运机运行的坡度要求；出矿道每个采区布设一条，采用下坡、平坡、爬坡的方式满足各分层的采矿要求。

溜矿井的布置：根据矿体在纵向上的走势，通过分析后，初步考虑在 52 号、58 号和 62 号剖面各布置一条溜矿井，溜矿井离矿体端部最远距离分别为 85m（1331m 中段）和 135m（1451m 中段），能够满足铲运机的运行要求；根据两方案的不同特点，方案一的溜井布置离矿体 20~25m，以满足铲运机运行的坡度要求。另外考虑在 48 号剖面布置一条综合井连通 1451m 中段以上的 3 号溜矿井，以作充填、通风、倒渣之用。

7.2.3 采场布置

根据中国恩菲工程技术有限公司设计^[150]，采用上向水平分层膏体充填法，该方法适应于矿体中等稳固或中等偏下稳固，一般分两步骤回采；一步骤回采进路顶板及两帮均为矿体，底板是充填体。回采进路出矿全部结束后，进行膏体充填。二步骤进路回采时，进路顶板为矿石，两帮（或一帮）为充填体。

设计沿 58 号勘探线方向划分为 2 个盘区，盘区沿矿体走向方向布置，长约 70m，宽约 12m，如图 7-2 所示。

阶段高度 60m，分段高度 12m，分层高度 3m。矿房垂直走向布置，矿房、矿柱宽度设计为 5m 和 6m 两种方案，长度为矿体厚度，先采矿柱后采矿房，矿柱采用分段或分层膏体充填方式，待分段相邻矿柱回采结束后再进行矿房的回采，矿柱采用分层充填方式，矿房采用膏体充填方式。

1331m 中段一分层采矿标高为 1333.0m，沿走向将矿体划分为两个盘区，图 7-2 中 1~4 号矿柱和 1~4 号矿房为 1 号盘区，

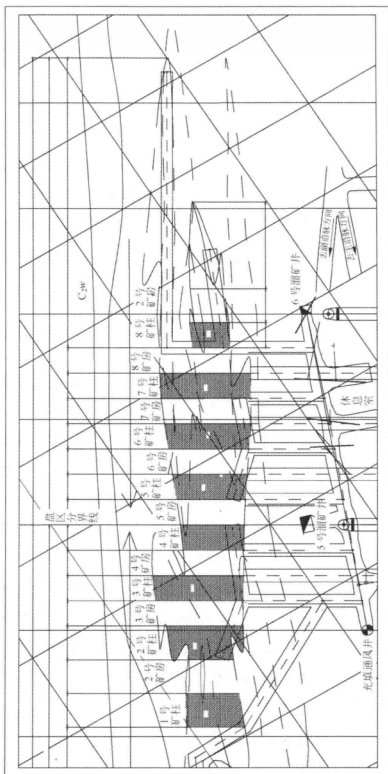


图 7-2 首采区盘区划分及采场布置平面图(1331m 中段第一分层)

5~8号矿柱和5~8号矿房为2号盘区。沿下盘开掘脉外沿脉,距矿体7~15m,每个矿房和矿柱共用一条出矿道。在中部厚大矿体矿房矿柱按宽6m布置。在端部及薄矿体按5m布置,可根据矿体稳固情况对回采宽度(或长度)作相应调整。生产过程中要根据矿体沿走向上的侧伏,往北东方向选择适当位置逐步增加矿柱,具体位置根据生产探矿情况在生产过程中确定。

7.2.4 回采工艺

(1) 凿岩。采用7655型凿岩机或凿岩台车进行浅孔凿岩,孔深2~2.8m。

(2) 爆破。采用2号岩石乳化炸药,非电秒延期导爆管、火雷管、导火索连接点火起爆。

(3) 采场通风。主要采用局扇抽出式通风方式,辅助以压入新鲜风。

通风线路:新鲜风经15号坑→3号斜井→中段沿脉→采准道→采场→采准斜坡道→1331至1451充填通风井→1451至1571充填通风井→1571至1631原2号溜矿井→1631m中段主扇排入地表。

(4) 顶板管理。施工中要及时对顶板进行锚杆支护,支护网度1.5m×1.5m或1.5m×1.0m,局部地方采用立柱、丛柱、垛木等支护形式。

(5) 出矿。采用2m³进口铲运机进行出矿,首采分段矿石经采场→分段平巷→装矿巷道→装车。

溜矿井内的矿石在1331m中段平面装车后,通过2号竖井1751m中段,用电机车拉运到1号主溜井系统,然后归入1号主

竖井进行出矿。

(6) 充填工作。矿柱采用膏体胶结充填方式。根据设计要求, 充填体强度必须达到 C5 ~ C10, 不得低于 C5。

充填管线布置: 充填料经 2 号斜井→1451 至 1571 充填通风井→1331 至 1451 充填通风井→分段平巷→采场。

充填接顶工作: 为使膏体充填接顶, 矿柱最后一个分层顶板控制为微倾斜, 坡度 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 。最后采用人工从上盘往下盘分段进行接顶或采用加压接顶方式。

(7) 充填排水。考虑到无论采用哪种充填方式, 排水工作都是必不可少的。排水路线为: 采场→分段平巷→排水巷道→1331 水仓→1451 水仓→15 号坑排出地表。

首采分段结束后, 先利用铲运机对水仓及排水道进行清淤处理后再对脉外沿脉进行封堵, 将之用作沉淀池, 封堵时应特别注意对钻孔和溜井口进行防漏水处理。

7.3 工程主动控制

工程主动控制就是预先分析控制目标偏离的可能性或为预先达到期望效果提供条件, 并拟订和采取各项预防性措施, 以使计划目标得以实现。主动控制是一种前馈控制, 又是一种事前控制; 通常是一种开环控制, 又是一种面对未来的控制。可以采取的措施有:

(1) 进行详细现场调查, 并分析研究开采技术条件。确定影响回采目标实现和设计实施的各种有利和不利因素, 并将这些因素考虑到设计和其他防范措施之中, 分析工程实施的可行性。该项工作是整个工程主动控制最重要内容之一。

(2) 识别岩爆灾害诱发的风险。揭示各种岩爆灾害诱发影

响因素和防治措施实施过程的核心问题,为灾害风险分析和更改设计提供依据,并在计划实施过程中做好岩爆灾害风险预测工作。

(3) 用科学的方法制定岩爆灾害防范措施计划,做好设计可行性分析,消除造成设计不可行、技术不可行和经济不可行的各种影响因素,保障工程项目的实施能够有足够的条件,并在此基础上力求使计划得到优化。事实上,计划制定得越明确、完善,就越能设计出有效的控制系统,也就越能使控制产生更好的效果。

(4) 高质量地做好工程施工组织工作,使组织与目标和计划高度一致,把目标控制的任务与管理职能落实到适当的机构和人员,做到职权与职责明确,使全体成员能够通力协作,为共同实现目标而努力。

(5) 制定必要的设计备用方案,以对付可能出现的影响目标或计划实现的情况。一旦发生这些情况,应有应急措施做保障,从而可以减少偏离量,或避免工程实施发生偏离。

(6) 计划应有适当的松弛度,即“计划应留有余地”,以避免那些经常发生但又不可避免的干扰因素对计划产生影响,减少意外情况产生的数量,从而使设计和管理人员处于主动控制地位。

(7) 保证灾害发生报告沟通信息渠道畅通,加强信息收集、整理和研究工作,为预测工程未来发展状况提供全面、及时、可靠的信息。

工程主动控制和工程被动控制的区别是:工程主动控制是工程结构控制不出现偏差,而工程被动控制是提前制定措施,出现偏差进行纠偏。

7.3.1 前期回采顺序存在的问题

矿柱不仅用于维护矿房的稳定,也用于隔离大面积空场与保护井巷及人员设备的安全。在实际工作中必须兼顾这两方面的因素,既能维护采场的稳定性,又能使矿石回收率最高^[151]。从维护采场稳定性方面考虑,如果个别矿柱尺寸过小或在矿柱上产生较大应力集中,一旦其被破坏,势必使采场实际跨度过大而导致冒顶事故的发生。与此同时,覆岩压力转移到其他相邻矿柱上也可能迫使这些矿柱破坏,从而引发“多米诺效应”式矿柱连续破坏。

矿体开采引起的应力重分布导致矿柱荷载的增加,如图 7-3 所示。如果矿柱中的应力状态高于原岩强度,则矿柱发生破裂。采矿关心的通常首先是矿柱峰值承载能力,其次关心的是矿柱峰值后或是最终的荷载位移特性。

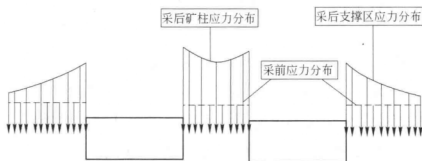


图 7-3 随着采场回采矿柱轴线方向应力分量分布状态

8 号矿体 1331m 中段三分层回采采用上向水平分层充填采矿法,矿体回采主要采用采场分区、矿房矿柱回采工艺方式,回采顺序采用两翼向中间连续回采。该设计能够提高生产效率、有利于膏体充填的实施和降低部分充填挡墙成本。1331m 中段三分层回采设计如图 7-4 所示。

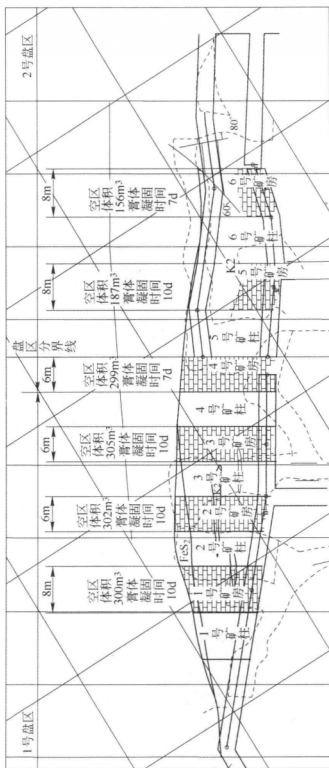


图 7-4 8 号矿体 1331m 中段三分层回采设计平面图

根据图 7-3 应力重分布图解、图 7-5 微震监测 1331m 中段三分层微震事件分布可知, 1331m 中段连续回采至 4 号矿房和 5 号矿柱时, 在 4 号矿柱和 5 号矿房产生应力集中。

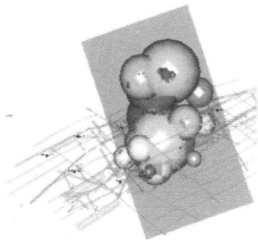
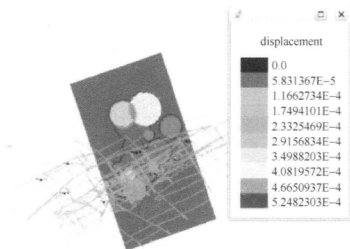


图 7-5 4 号矿房和 5 号矿柱回采微震事件分布

如图 7-6 所示, 随着回采的进行, 由于采用两翼向中间连续回采顺序, 回采至 4 号矿房和 5 号矿柱时, 导致围岩处于应力集中状态, 塑性变形引起位移范围逐渐扩大。



(a)

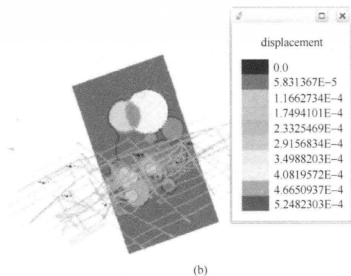


图 7-6 4 号矿房和 5 号矿柱回采过程微震事件位移分布云图

如图 7-7 所示, 当三分层回采结束时, 4 号矿房和 5 号矿柱回采位移变化, 引起下部充填体位移达 48mm, 顶板围岩达 16mm。

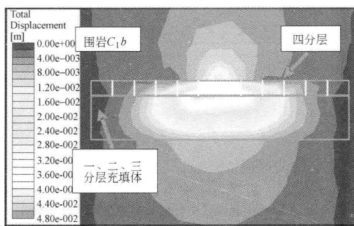


图 7-7 4 号矿房和 5 号矿柱回采位移变化

如图 7-8 和图 7-9 所示, 当三分层回采结束时, 4 号矿房和 5 号矿柱回采应力变化, 引起 4 号矿柱和 5 号矿房最大主应力达

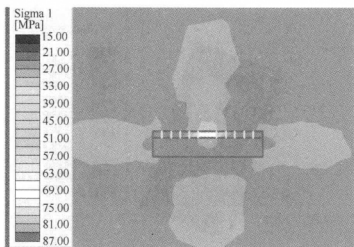


图 7-8 4 号矿房和 5 号矿柱回采结束最大主应力分布

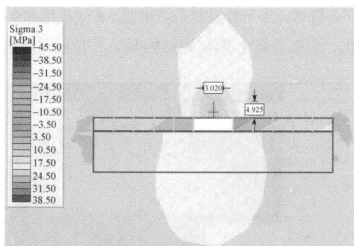


图 7-9 4 号矿房和 5 号矿柱回采结束最小主应力分布

36MPa, 顶板围岩最小主应力达 -3.5MPa , 已经超过围岩 C_1b 的抗拉强度, 有可能产生顶板冒落, 冒落范围达长 \times 高 = $3\text{m} \times 4.9\text{m}$ 。

1331m 中段三分层回采顺序存在的主要问题是: 当从矿体两

翼回采至矿体中间位置时,由于应力重分布导致中间矿房、矿柱应力集中,引起岩体破坏,产生较大规模的塑性变形,加大了中间矿房或回收矿柱时的回采难度。所以,必须对前期的回采顺序进行优化调整。

7.3.2 基于微震监测和数值模拟的回采顺序优化

数值模拟分析的目的之一是为了在采矿生产过程中检验初设参数和假设条件的合理性,圈定矿山地质构造及应力集中位置。利用微震监测技术对可能发生较大规模失稳破坏的地点和时间进行预警,指导可能需要的抢救工作。研究地震学参数在矿岩失稳前的时空变化规律,掌握矿区地震学参数的正常稳定变化模式,探测到微震事件参数有强烈时空变化的情况时,及时调整生产战略,及时预警并避免工作人员在岩爆灾害危险条件下的暴露。运用微震监测数据和矿山实际发生的重大失稳事件的有关资料进行反分析,总结岩爆灾害前兆特征和各种参数变化规律之间的关系,为矿体回采顺序优化提供参考资料。

通过分析 1331m 中段三分层回采应力状态、位移变化及微震事件分布特征,对 1331m 中段四分层进行回采顺序优化。

8 号矿体 1331~1451m 中段已完成开拓施工,四分层回采仍然采用上向水平分层充填采矿法,四分层底板标高 1356m,分层高度 4.0m;矿体回采主要采用采场分区、矿房矿柱回采工艺方式。

根据地质资料,结合现场工程条件,回采区划分为两个盘区:58 线以北为 1 号盘区,走向长 117.138m;58 号线以南为 2 号盘区,走向长 98.62m。

矿房、矿柱垂直矿体走向布置,宽度均为 6m。根据现场

施工所揭露的矿体赋存状况,确定矿体端部的小矿体矿房结构参数。

1号盘区共有6个矿房、5个矿柱,2号盘区共有1个矿柱。考虑膏体保养期较长,为了协调生产,确保出矿量,充填方式采用膏体联合充填或干式充填方式,其中矿房及矿柱采用膏体充填,矿体端部小矿体采用干式充填。回采时,可根据现场实际协调生产,从两翼向中间后退式回采,确保采场个数满足生产要求。

根据三分层回采情况,2号盘区三分层已全部回采结束,并充填完毕。至2008年10月,1号盘区还有三分层1号、2号、3号矿柱及1号、2号、3号矿房未回采,其余均回采结束。根据三分层空区情况,四分层的回采顺序按6号矿房、4-10、4-11、1号矿房、5号矿房、2号矿房、4号矿房、3号矿房、5号矿柱、1号矿柱、4号矿柱、2号矿柱、3号矿柱、6号矿柱、4-6、4-7、4-8、4-1、4-2、4-3、4-4、4-5进行。1号、2号盘区按照矿房矿柱回采顺序施工,如表7-1所示。

表 7-1 8号矿体 1331m 中段四分层回采计划

位置	矿房编号	回采时间(2007年)	理论储量/t	充填方式	充填量/m ³
1号 出矿道	6号矿房	10-20~10-25	1399.70	膏体充填	389.89
	4-10	10-20~10-25	2169.46	膏体充填	604.31
	4-11	10-26~11-02	3233.65	膏体充填	900.74
	1号矿房	10-26~11-02	1295.85	膏体充填	360.96
	5号矿房	11-03~11-07	1502.22	膏体充填	418.45
	2号矿房	11-03~11-07	1477.00	膏体充填	411.42

续表 7-1

位置	矿房编号	回采时间(2007 年)	理论储量/t	充填方式	充填量/m ³
1 号 出矿道	4 号矿房	11-08 ~ 11-12	1622.53	膏体充填	451.96
	3 号矿房	11-13 ~ 11-17	1507.91	膏体充填	420.03
	5 号矿柱	11-13 ~ 11-17	1507.75	膏体充填	419.99
	1 号矿柱	11-18 ~ 11-22	1418.39	膏体充填	395.10
	4 号矿柱	11-18 ~ 11-22	1632.08	膏体充填	454.62
	2 号矿柱	11-23 ~ 11-27	1534.18	膏体充填	427.35
	3 号矿柱	11-23 ~ 11-27	1619.74	膏体充填	451.18
	6 号矿柱	11-28 ~ 12-01	1345.21	膏体充填	374.71
	4-6	11-28 ~ 12-01	1227.85	膏体充填	342.02
	4-7	12-02 ~ 12-04	1429.68	膏体充填	398.24
	4-8	12-02 ~ 12-04	727.94	膏体充填	202.77
3 号 出矿道	4-1	12-05 ~ 12-07	640.86	膏体充填	178.51
	4-2	12-05 ~ 12-07	1190.95	膏体充填	331.74
	4-3	12-08 ~ 12-11	955.65	膏体充填	266.20
	4-4	12-08 ~ 12-11	577.46	膏体充填	160.85
	4-5	12-08 ~ 12-11	1193.10	膏体充填	332.34
合计		50d	31209.16		8693.38

1331m 中段四分层回采顺序优化设计的最终方案如图 7-10 所示。

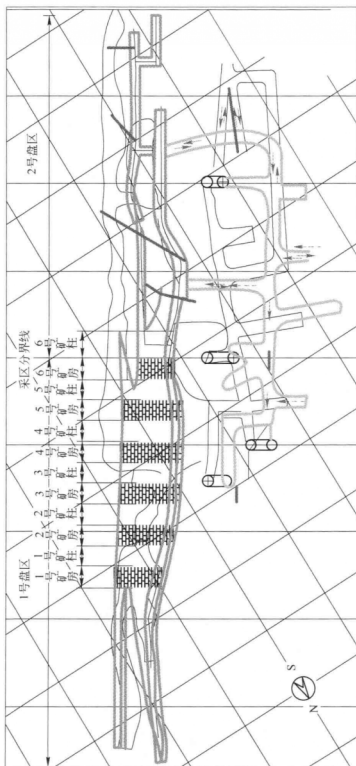


图 7-10 1331m 中段四分层回采顺序优化设计

采用优化后的回采方式后,得到新的四分层微震监测位移分布云图,如图 7-11 所示。通过与图 7-6 三分层微震监测位移云图对比分析可知,采用新的回采方式后,四分层比三分层塑性区破坏面积明显降低;四分层最大位移量 $1.89\text{E}-4\text{m}$ 比三分层最大位移量 $5.25\text{E}-4\text{m}$ 降低 64%。

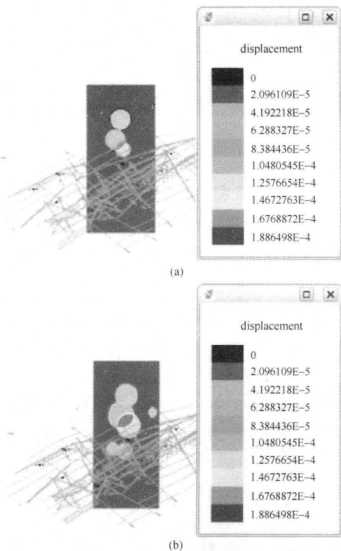


图 7-11 四分层回采过程微震监测位移分布云图

如图 7-12 所示,四分层回采结束时,引起下部充填体位移仅

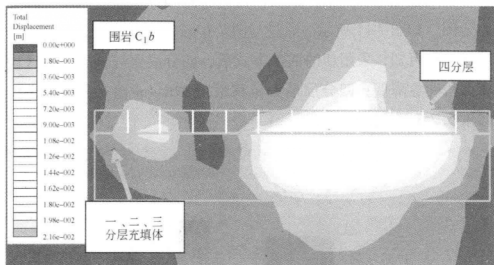


图 7-12 四分层回采结束位移分布

为 21.6mm，比三分层回采时降低 28mm，下降达 58%；顶板围岩下降仅为 5mm，比三分层回采时降低 15mm，下降达 69%。

由上述分析可以证明，采用类似四分层回采顺序方式，可以达到有效控制围岩变形的目的。

从图 7-13 和图 7-14 可以看出，当四分层回采结束时，在采空

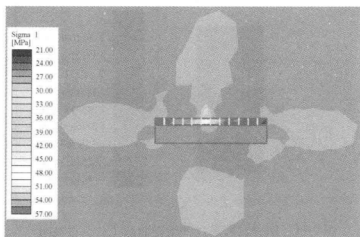


图 7-13 四分层回采结束最大主应力分布

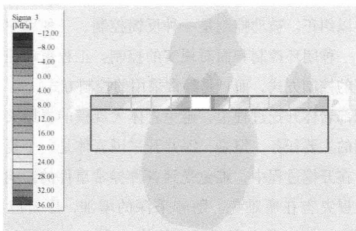


图 7-14 四分层回采结束最小主应力分布

区周边引起的最大主应力为 33MPa，顶板围岩最小主应力为 6MPa，为压应力，远小于岩体抗压强度，故不会产生顶板冒落。

随着微震监测及数值模拟技术在深井开采实践中进一步深入和推广应用，人们对深井开采岩爆灾害的认识在逐步加深，据此总结出来的各种规律对岩爆灾害的预防和控制也会起到越来越大的推动作用。

7.4 工程被动控制

工程被动控制是指通过设计改变岩体结构的刚度、阻尼和受力大小等参数及其在岩体结构体系中的分布状态，或者改变外荷载的传递途径，以达到抑制工程结构对外部荷载响应的目的。在实际岩体开挖工程中所指的工程被动控制，是指当岩体按照设计开挖时，对岩体参数变化情况进行跟踪，将岩体参数的变化信息进行分析整理，再采取相应的措施，从工程运行过程中发现问题，找出误差，寻求并确定解决问题和纠正误差的方案，然后再

反馈给计划实施系统付诸实施,使得计划目标一旦出现偏离标准值就能得以纠正。被动控制是一种反馈控制、一种事中控制和事后控制、一种闭环控制和面对现实的控制。工程被动控制是一种十分重要的控制方式,而且是经常采用的控制方式。

在深部岩体开挖过程中,避免岩体大规模的岩爆灾害是工程主动控制的主要任务。但是,深井开采围岩体是一个复杂的工程地质体,在开挖过程中,难免受到各种异常事件的影响,发生小规模岩爆灾害在所难免。随着采深的增加,原岩应力逐渐增大,局部岩体的岩爆灾害可能直接影响到生产的顺利进行。因此,必须采取相应的被动控制措施,如开挖岩体湿喷纤维混凝土支护、树脂锚杆支护和膏体充填支护等,根据开挖揭露岩体特征和工程结构条件等,把局部岩体发生失稳破坏程度降到最低^[152~161]。下面以8号矿体开采前期水砂充填存在的问题和现阶段膏体充填工程为例,进行详细的深部开采岩体工程被动控制分析研究。

7.4.1 水砂充填存在的问题

水砂充填是充填采矿法的一种,它是利用水力将砂子、碎石或炉渣等充填材料输送到井下,用来支撑围岩,防治或减少围岩垮落和变形。充填采矿在国外较早引起人们的重视,为了控制采区的地表移动,美国一个煤矿首次应用了水砂充填法采矿。在20世纪50年代,澳大利亚的一些地下金属矿山,以水力充填取代了早期使用的干式充填。1969年澳大利亚科学与工业研究院开展了机械落矿充填采矿法的相关问题研究。

自20世纪80年代末,云南驰宏锌锗股份有限公司前期使用的采矿方法为上向水平分层水砂充填法。在生产过程中,主要暴

露出以下几个问题:

(1) 尾矿库增容困难。由于矿山一直采用粗粒级碎石水砂充填采矿法,没有消耗大量的尾砂,经过 50 余年的生产过程,尾矿库蓄积了 60 余万吨选矿尾砂和 100 多万吨炼铅水淬渣,而且每年以 25 万~30 万吨尾砂和水淬渣的排放量增加。根据可行性研究^[162],分析尾矿库周围地形,把老尾矿坝加高使老尾矿库增容比较困难。对老尾库来说,其已经不能满足现阶段矿山改建工程(2000t/d)堆存尾矿要求。

(2) 固体废弃物对环境造成污染。现有的尾矿库容量有限,不能堆存矿山扩建后产生的大量尾砂。大量的工业废弃物堆积在地表,不仅占用了大量土地,而且对环境造成污染。同时,受矿区地形的限制,尾矿库和水淬渣场已无法扩容,且矿区属于长江上游水土保持和环境保护区,工业废弃物排放和堆存受到严格限制。

(3) 充填体自身强度低。水砂充填料缺乏内聚特性,不能形成自稳的充填体,强度低,凝固周期长,不能满足采场对充填体强度的要求,充填体凝固时间也达不到采场回采速度的要求。

(4) 充填体与围岩耦合不充分。由于水砂充填体材料为非胶结材料,含颗粒多,脱水量大,强度不高、内聚力小,在爆破等动载荷作用下存在被重新液化的危险性(见图 7-15)。因此,充填体对围岩的支撑作用较弱,不能很好地阻止岩层移动。

(5) 采场充填体脱水、脱泥困难。采用水砂充填采矿技术,水砂充填的质量浓度仅为 30%~40%,在采场内需脱水,大量的充填水提高了排水费用。由于充填体凝固周期长,导致采场脱水时间长,排水效率低,而且增加了充填用水、排水设施等。另外,泥砂污染巷道和清理水仓工作繁重。



图 7-15 水砂充填体采场溢出

(6) 水砂充填提高矿石贫化率和损失率。由于水砂充填体表面平整度不高、充填体与围岩耦合不充分。在回采过程中，8号矿体上盘围岩容易发生垮落，大大增加了矿石的贫化率和损失率，使贫化率达10%，损失率达5%。尽量增加充填体表面平整度是充填采矿法降低贫化率和损失率的重要技术措施之一，同时，也为机械化自行设备创造了理想的行走条件。

(7) 充填体接顶效果差。对充填采矿法而言，接顶效果是评价充填质量的重要因素之一。根据8号矿体前期充填效果，水砂充填后留有较大的空间，接顶效果差，不利于充填体对上、下盘围岩和顶部矿体有效支撑。

综上所述，水砂充填在一定程度上能够满足采矿的进度，但其也具有充填体强度低，脱水、脱泥困难，加大矿石贫化率和损失率以及接顶效果差等诸多缺点。所以，必须采取相应的技术措施来满足深井开采的要求。

7.4.2 膏体充填工艺

膏体充填技术是解决深井开采安全和矿山环境保护的有效途

径。随着浅部矿产资源的耗尽,世界各国都面临深部开采的现实,这是实现矿业可持续发展的重要方法和手段。

全尾砂-水淬渣膏体充填是一项当今国际上最为先进的矿山充填技术之一。其优点是可以最大限度地利用矿山工业废弃物,充填体在采场内无需脱水,强度高、水泥消耗量少、成本低、接顶效果好,充填体能够对采场顶板和围岩进行有效支护,能够确保采矿生产安全和实现矿山生产废物接近零排放。

全尾砂膏体充填技术的成熟,为创建无废或少废矿山开辟了新途径,大大地改善地表和地下的环境状况。膏体充填可以利用细粒级尾砂增加膏体的流动性,减小输送时的阻力损失,并获得较好的充填体强度。

7.4.2.1 膏体充填流程

(1) 准备工作。当一条进路回采结束后,便进行充填准备工作:清理底板矿石,计算充填量,架设充填挡墙和充填管。充填准备工作由采场其他工种完成。充填准备工作需6工班。

(2) 膏体制备。根据充填配料表,配制浓度78%~80%的膏体,膏体配比为全尾砂:水淬渣:水泥=7:1:1,深锥浓密机放砂浓度不得低于76%,放砂流量 $40\sim 80\text{m}^3/\text{h}$ 。

(3) 充填。充填时,通过三通管的各个闸阀控制充填膏体和洗管水的流向。充填前,打开洗管线的闸阀,对充填管进行一次彻底的清洗,一是检查管线是否畅通,连接是否牢固;二是排出管内滞留膏体,保证充填畅通。按充填工艺要求清洗好充填管保证充填准备工作到位后,关闭洗管线的闸阀,打开膏体充填支管的闸阀,使膏体沿充填分管线路进入采场空区开始充填工作。充

填结束后, 关闭充填分管的闸阀, 开启洗管线的闸阀清洗充填管线, 使洗管水进入分层排水小井, 再由排水小井排到沉淀池进行沉淀, 沉淀一段时间后将水抽入最终的沉淀池, 沉淀物采用铲运机铲入采空区进行充填。如图 7-16 所示。

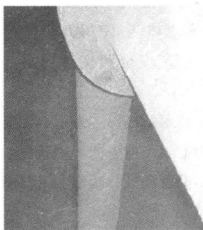


图 7-16 采场膏体充填管出口料浆形态

7.4.2.2 膏体充填管路布置

膏体联合充填的管线布置如图 7-17 所示。

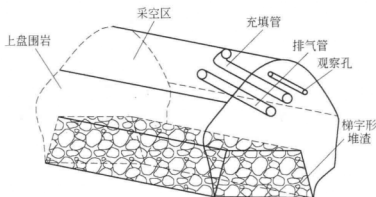


图 7-17 联合充填管线布置示意图

采场需要 3 根管道, 分别是充填管、排气管与观察孔。充填管为增强塑料管, 直径为 150mm。排气管采用普通塑料管, 直径 50mm 即可。观察孔与排气管规格相同。

7.4.3 膏体充填和水砂充填对比

会泽铅锌矿近 30 年来的水砂充填和近 3 年来的膏体充填统计结果对比如表 7-2 所示。

表 7-2 水砂充填和膏体充填对比

内 容	水 砂 充 填	膏 体 充 填
浓 度	公分石 (m^3): 水 (m^3) = 1:3, 浓度基本维持在 30% ~ 40%	78% ~ 81%
流 量	靠水的冲击作用将公分石带入采场, 流量较大, 达 $300\text{m}^3/\text{h}$	$70 \sim 100\text{m}^3/\text{h}$
强 度	强度很低, 接近 0MPa	28d 龄期: 5 ~ 7MPa
脱水、脱泥	非常多	极少
矿石贫化率	10%	7%
矿石损失率	5%	1%
原 料	外购公分石 (含泥量大)	水泥、水淬渣、尾砂
充填接顶	无法接顶	基本接顶
隔 墙	柔性隔墙	密闭隔墙
充填体	不凝固, 强度低, 无法自稳, 相邻矿房开采时易坍塌	自立性强, 凝固好, 强度高
充填成本	<ol style="list-style-type: none"> 公分石外购, $40 \sim 70$ 元/m^3; 管道磨损较严重, 尤其在转弯处; 采场脱水, 排水成本较高; 采场脱泥, 排泥成本较高; 井下污染严重; 矿石贫化损失严重; 需要人工构筑假底; 据统计水砂综合成本约 130 元/m^3 	<ol style="list-style-type: none"> 水泥外购, 350 元/t; 水淬渣运输费用, 其他不计成本; 设备较多, 维修费用较高; 目前膏体充填综合成本为 120 元/m^3
充填工艺	简单, 原始	复杂, 先进

从表 7-2 对比表明:

(1) 由于膏体充填质量浓度比水砂充填高 40% ~ 50%, 充填后, 水砂充填需要的脱水、脱泥量大, 由此带来大量巷道污染和繁重的清理水仓工作。

(2) 充填体 28d 龄期强度, 水砂充填极低, 无法自稳, 相邻矿房开采时易坍塌, 而膏体充填达到 5 ~ 7MPa, 能够保障采场回采围岩稳定。

(3) 膏体充填矿石贫化率为 7%, 比水砂充填下降 30%; 损失率为 1%, 比水砂充填下降 80%。

(4) 通过大量现场调查, 发现水砂充填基本不能接顶, 而膏体充填接顶效果非常好。

虽然水砂充填具有流量大的优点, 但综合考虑充填成本及效率, 水砂充填已经不能满足由开采导致采深日益增加的需要。而膏体充填具有强度高、接顶效果好、浓度高、无需脱泥、脱水等优点, 可以有效控制围岩变形。

7.4.4 膏体充填对采动围岩作用分析

膏体充填能够被矿山接受的主要原因之一是能够利用其低孔隙率的特点, 来减少深井开采高应力区的微震活动。在薄矿脉中利用膏体充填材料能够对围岩收敛提供足够的抵抗力, 从而阻止岩爆灾害的发生。尤其是在深部高应力区, 采用快速膏体充填(或废石+膏体)可以允许通过调整回采顺序来改善围岩应力状态, 从而对岩爆灾害进行管理。在高应力环境下, 矿体回采导致应力集中, 因生产爆破引起岩体破坏不可避免, 这使得回采中间矿柱的难度加大。因此, 需要对采场回采顺序进行调整, 几个采场同时进行回采。由于膏体充填可以允许循环

时间,所以在高应力区采用回采顺序优化控制岩爆灾害的发生是有可能的。

如图 7-18 所示,利用微震监测技术和数值模拟分析,得出了四分层回采过程中应力分布特征。当 1331m 中段四分层第一步回采时,最大主应力分布特征为:在采空区上部及相邻两个采场产生应力集中区,应力达 33.4MPa,影响范围在水平相邻的两个采场达 17.5m,采场上部顶板围岩影响范围为 23.3m。

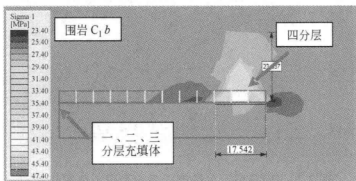


图 7-18 四分层第一步回采最大主应力分布状态

如图 7-19 所示,当四分层第一步回采时,总位移分布特征

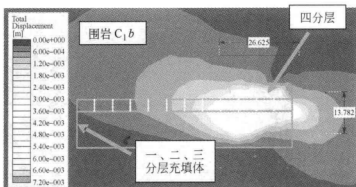


图 7-19 四分层第一步回采总位移分布状态

为：影响范围和最大主应力不尽相同，其特点是对采空区左侧两个采场影响较大，尤其是采场左下角，位移达 7.2mm，位移大于 2mm 的影响范围达 26.6m × 13.8m。

当四分层回采结束后，如图 7-20 所示，最大主应力分布特征为：膏体充填采空区后，岩体应力为 25.5MPa；在矿体走向方向和上部顶板围岩内形成 28.5MPa 高应力区。

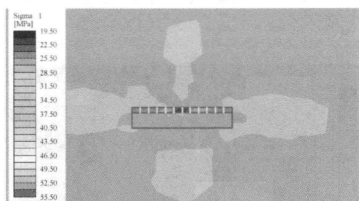


图 7-20 四分层回采结束后最大主应力分布状态

如图 7-21 所示，回采结束后，最大总位移达 10.8mm，其中大于 2mm 的围岩位移影响范围达 69.09m × 30.45m，最大位移范围主要分布在 3 ~ 5 号矿房之间。

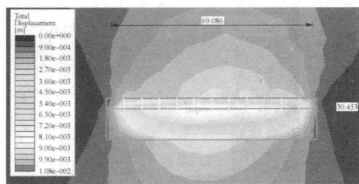


图 7-21 四分层回采结束后总位移分布状态

通过上述分析,采用回采顺序优化和膏体充填控制围岩变形的结果显示:回采顺序优化前,四分层回采结束时,导致最大总位移为 21.6mm,优化后仅为 10.8mm,降低了 50%。由此可见,回采顺序优化取得了较好的效果。

结 语

针对 8 号矿体回采过程中遇到的问题,提出了微震监测结合数值模拟技术进行回采顺序优化方法;利用膏体充填技术,可以有效地控制围岩变形,从而达到安全回采的目的。在会泽铅锌矿 8 号矿体回采过程中进行了工程控制,并取得了良好的控制效果。

(1) 运用结构控制相关手段,提出了深井开采岩爆灾害工程控制的相关流程,实现了工程主动控制和被动控制相结合在回采过程中的工程应用,扩展了深井开采岩爆灾害控制技术的方法。

(2) 详细分析了前期回采顺序存在的主要问题,运用微震监测和数值模拟相结合的手段,对深部回采顺序进行了优化。结果表明:优化后可以有效地控制围岩变形,位移降低约 60%,对岩爆灾害的预防和控制起到一定的推动作用。

(3) 深入剖析了前期水砂充填存在问题,指出了膏体充填的优点,根据多年的现场统计结果,进行了膏体充填和水砂充填参数对比,发现在浓度、强度和接顶效果方面,膏体充填要高于水砂充填,而脱水、脱泥量和矿石贫化损失率要低于水砂充填,从而在一定程度上降低了排水清污费用和资

源浪费。

(4) 利用微震监测技术和数值模拟分析, 进行回采顺序优化; 采用膏体充填技术, 四分层比三分层回采结束时, 最大总位移降低了 50%。由此可见, 回采顺序优化及膏体充填可以有效地控制围岩的变形。

参 考 文 献

- [1] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 国家安全生产科技发展规划——非煤矿山领域研究报告(2004~2010)[R]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局, 2003.
- [2] 中华人民共和国国务院. 有色金属产业调整和振兴规划. 北京: 国务院, 2009.
- [3] 古德生, 李夕兵. 有色金属深井采矿研究现状与科学前沿[C]//中国有色金属学会第五届学术年会论文集. 2003: 1~3.
- [4] 王春来, 吴爱祥, 徐必根, 等. 某深井矿山微震监测系统建立与网络优化研究[C]//第十届岩石力学与工程大会论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008: 120~128.
- [5] Cook N G W. Seismicity induced by mining[J]. Engineering Geology, 1976(10): 99~122.
- [6] Salamon M D G. Rockburst hazard and the fight for its alleviation in South African gold mines[C]//Proc. Symp. Rockbursts: prediction and control/London/ 20 October 1983. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1983: 11~36.
- [7] Ortlepp W D, Stacey T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1992, 9: 1, 59~65.
- [8] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803~2813.
- [9] 何满潮. 深部开采工程岩石力学的现状及其展望[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 88~94.
- [10] 晏玉书. 我国煤矿软岩巷道围岩控制技术现状及发展趋势[C]//何满潮. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996: 1~17.
- [11] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展——深部岩体力学的若干问题[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 10~17.

- [12] 尹贤刚, 李庶林. 岩石受载破坏前兆特征——声发射平静研究[J]. 金属矿山, 2008, 385(7): 124 ~ 128.
- [13] 张省军, 刘建坡, 石长岩, 等. 基于声发射实验岩石破坏前兆特征研究[J]. 金属矿山, 2008, 386(8): 65 ~ 68.
- [14] 张茹, 谢和平, 刘建锋, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2584 ~ 2588.
- [15] 李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2559 ~ 2563.
- [16] 龙辉, 秦四清, 朱世平. 滑坡演化的非线性动力学与突变分析[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 331 ~ 335.
- [17] Zhao Yixin, Jiang Yaodong. Acoustic emission and thermal infrared precursors associated with bump-prone coal failure [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 1(83): 11 ~ 20.
- [18] Lei Xinglin, Koji Masuda, Osamu Nishizawa, et al. Detailed analysis of acoustic emission activity during catastrophic fracture of faults in rock [J]. Journal of Structure Geology, 2004, 26: 247 ~ 258.
- [19] Mckinnon S D. Triggering of seismicity remote from active mining excavations [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2006, 39(3): 255 ~ 279.
- [20] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 煤岩冲击失稳的机理和实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [21] 李铁, 蔡美峰, 左艳, 等. 采矿诱发地震的震源机制特征——以辽宁省抚顺市老虎台煤矿为例[J]. 地质通报, 2005, 24(2): 136 ~ 144.
- [22] 邹德蕴, 姜福兴. 煤岩体中储存能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 159 ~ 163.
- [23] 刘滨. 基于最小耗能原理的岩爆孕育发生机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土所, 2009.
- [24] Trifu C I, Shumila V. Microseismic monitoring of a controlled collapse at Ocnele Mari, Romania[C]//The 42nd U. S. Rock Mechanics-2nd U. S. -Canada Rock Mechanics Symposium. San Francisco: American Rock Mechanics Association,

- 2008.
- [25] Scotti O, Cornet F H. In situ evidence for fluid-induced aseismic slip events along fault zones [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 31(4): 347 ~ 358.
 - [26] Trifu C I, Urbancic T I. Fracture coalescence as a mechanism for earthquakes: observations based on mining induced microseismicity [J]. Tectonophysics, 1996, 261(1-3): 193 ~ 207.
 - [27] Arasteh M M, Chudnovsky A, Dudley J W. Broadband acoustic emission observations during fracture propagation in rock-like material [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 1 ~ 13.
 - [28] 杨志国, 于润沧, 郭然, 等. 基于微震监测技术的矿山高应力区采动研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3632 ~ 3638.
 - [29] 徐奴文, 唐春安, 沙椿, 等. 锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 915 ~ 920.
 - [30] 袁子清, 杨小聪, 唐礼忠. 冬瓜山铜矿矿山地震活动响应规律研究 [J]. 有色金属, 2009, 61(1): 113 ~ 115.
 - [31] Whyatt J K, White B G. Rock bursting and seismicity during ramp development, Lucky Friday Mine, Mullan, Idaho [C] // Proceedings of the 17th International Conference on Ground Control in Mining, 1998: 317 ~ 325.
 - [32] Styles P, Bishop I, Toon S. Surface and borehole microseismic monitoring of mining-induced seismicity [J]. Modern Geophysics in Engineering Geology, 1997(12): 315 ~ 326.
 - [33] Eneva M. In search for a relationship between induced microseismicity and larger events in mines [J]. Tectonophysics, 1998, 289(1): 91 ~ 104.
 - [34] Senfaute G, Chambon C, Bigarre P, et al. Spatial distribution of mining tremors and the relationship to rockburst hazard [J]. Pure and Applied Geophysics, 1997, 150(3/4): 451 ~ 459.
 - [35] Coulson A L, Bawden W F, Crowder J J. Estimation of the peak and post-peak behaviour of fractured rock masses using spatial and temporal analysis of mine

- induced microseismicity[C]//Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium -Rock Mechanics Meeting Society's Challenges and Demands. Taylor and Francis/Balkema, 2007(2): 1395 ~ 1404.
- [36] 李小军, 路广奇, 李化敏. 基于声发射事件 b 值变化规律的岩石破坏前兆识别及其局限性[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(5): 663 ~ 666.
- [37] 刘宗燕, 纪洪广. 鲍店煤矿矿山地震的 $G-R$ 关系分析[J]. 矿业快报, 2007, 455(3): 36 ~ 38.
- [38] 李铁, 蔡美峰, 纪洪广, 等. 强矿震预测的研究[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 260 ~ 263.
- [39] Carpinteri A, Lacidogna G, Puzzi S. Prediction of cracking evolution in full scale structures by the b value analysis and Yule statistics[J]. Physical Mesomechanics, 2008, 11(5): 260 ~ 271.
- [40] Trifu C L, Shumila V, Urbancic T I. Space-time analysis of microseismicity and its potential for estimating seismic hazard in mines [C]//The 4th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, 1997: 295 ~ 298.
- [41] 曹安业, 窦林名, 秦玉红. 微震监测冲击矿压技术成果及其展望[J]. 煤矿开采, 2007, 12(1): 20 ~ 23.
- [42] 芦东平. 矿震定位与可视化研究及其应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2008.
- [43] 潘一山, 赵扬锋, 官福海, 等. 矿震监测定位系统的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1002 ~ 1011.
- [44] 赵金花, 李波, 陆汉鹏, 等. 单一地震事件与多个地震事件的定位方法及应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2007, 28(4): 15 ~ 19.
- [45] 国家安全生产监督管理总局. 国家“十一五”安全生产科技发展规划. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 2006.
- [46] 唐春安. 矿山动力灾害前兆规律及微震监测分析技术研究 [EB/OL]. (2006-6-26) http://www.sdpc.gov.cn/nyjt/mkwsfzzl/mzyxx/t20060626_74566.htm.

- [47] 赵兴东,唐春安,李元辉,等.基于微震监测及应力场分析的冲击地压预测方法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S1):4745~4749.
- [48] 陆菜平,窦林名.煤岩动力灾害的强度弱化机理及其实践[C]//中国力学学会学术大会2005论文摘要集(上).北京:[出版者不详],2005.
- [49] 王磊.采厚对支承压力分布及动力灾害的影响研究[D].淮南:安徽理工大学,2006.
- [50] 冯国才,姚永明.断裂活动与矿山岩体地质动力灾害研究[J].辽宁工程技术大学学报,2002,21(5):571~573.
- [51] 姜福兴,曲效成,于正兴,等.冲击地压实时监测预警技术及发展趋势[J].煤炭科学技术,2011,39(2):59~64.
- [52] 王金安,纪洪广.地下开采地质动力灾害研究进展与思路[J].中国科技论文在线,2007:1~11.
- [53] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.国家安全生产科技发展规划——非煤矿山领域发展规划,2003.
- [54] 国家公务员网.申论热点:矿难[EB/OL].(2010-12-21)http://www.chinagwy.org/html/szl/slfw/201012/46_23366.html.
- [55] Mendecki A J. Seismic monitoring in mines [M]. London: Chapman and Hall Press, 1997.
- [56] 朱家锐,潘懿,王春来,等.应用Kaiser效应测定会泽铅锌矿地应力[J].采矿技术,2008,8(2):54~55.
- [57] Kaiser E J. A study of acoustic phenomena in tensile test [D]. Munchen: Technische Hochschule, 1950.
- [58] 长沙矿山研究院,云南驰宏锌锗股份有限公司.会泽铅锌矿6#矿体工程地质评价报告[R].长沙:长沙矿山研究院,2001.
- [59] Kristina L. Seismicity in mines[M]. Sweden: [s. n.], 2004.
- [60] Wang Chunlai, Wu Aixiang, Liu Xiaohui, et al. Mechanisms of microseismic events occurred in deep hard-rock mine of China[C]//The 7th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines, Liaoning Dalian, 2009, 245~251.

- [61] Hedley D G F. Rockburst handbook for Ontario Hardrock Mines [M]. Ottawa: Canada Communication Group, 1992.
- [62] Wawersik W R, Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1970(7): 561 ~ 575.
- [63] Reid H F. The elastic-rebound theory of earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1912, 2: 98 ~ 100.
- [64] Ortlepp W D. Rock fracture and rockbursts, an illustrative study [R]. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997.
- [65] 唐绍辉, 吴壮军, 陈向华. 地下深井矿山岩爆发生规律及形成机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1250 ~ 1254.
- [66] 吉学文, 王春来, 吴爱祥, 等. 某深井矿山岩爆特征及形成机理研究 [J]. 金属矿山, 2008(9): 23 ~ 25.
- [67] Wu Aixiang, Wang Chunlai, Liu Xiaohui, et al. Characteristics and mechanisms of rockburst in deep mine in China [J] // The 7th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines, Liaoning Dalian, 2009, 1037 ~ 1041.
- [68] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [69] 蔡文. 物元分析及其应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [70] 杨宏伟. 上市发电企业财务核心竞争能力研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [71] 武斌. 基于模糊物元的湖泊水质评价模型研究 [J]. 水利水电技术, 2007, 38(4): 12 ~ 15.
- [72] 韩梅, 傅正, 朱祥, 等. 模糊物元模型在浓醇饮用水安全评价中的应用 [J]. 研究与探索, 2009(12): 34 ~ 35.
- [73] 王万军. 多因素指标排序的模糊物元方法及其应用 [J]. 大庆师范学院学报, 2009, 29(6): 49 ~ 50.
- [74] 刘志峰, 王淑旺, 万举勇, 等. 基于模糊物元的绿色产品评价方法 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(2): 166 ~ 169.

- [75] 林杜. 基于模糊物元的水泥混凝土路面性能评价研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.
- [76] 张少聪. 基于模糊物元方法的上市公司财务失败预测[J]. 莆田学院学报, 2008, 15(4): 14 ~ 19.
- [77] 岩小明. 岩体顶板稳定性分析[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [78] 王靖, 张金锁. 综合评价中确定权重向量的几种方法比较[J]. 河北工业大学学报, 2001, 2(30): 52 ~ 57.
- [79] 李庶林, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 深井硬岩岩爆倾向性评价[J]. 东北大学学报, 2001, 22(1): 220 ~ 300.
- [80] 郭立, 吴爱祥, 马东霞. 基于 RES 理论的岩爆倾向性预测方法[J]. 中南大学学报, 2004, 35(2): 278 ~ 283.
- [81] 刘晓辉. 基于微震监测数据的岩爆预测研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2010.
- [82] 苏永华, 何满潮, 孙晓明. 岩体模糊分类中隶属函数的等效性[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(7): 670 ~ 675.
- [83] Gibowicz S J. Seismicity induced by mining: Ten years later [J]. Advances in Geophysics, 2001, 44: 39 ~ 181.
- [84] van Brink A Z. Application of microseismic system at Western Deep levels[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on 'Rockburst and Seismicity in mines Mines'. Rotterdam: Balkema, 1990: 355 ~ 361.
- [85] McGarr A. Some application of seismic source mechanism studies to assessing underground hazards[C]// In 'Rockburst and Seismicity in mines', Symp. Ser., 1984, 6: 199 ~ 208.
- [86] Sileny J. The mechanism of small mining tremors from amplitude inversion[J]. Pageoph, 1989, 129(3/4): 309 ~ 323.
- [87] 张少泉, 关杰, 刘力强, 等. 矿山地震研究进展[J]. 国际地震动态, 1994, 2: 1 ~ 6.
- [88] 李铁, 蔡美峰, 蔡明. 采矿诱发地震分类的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3679 ~ 3696.

- [89] Gibowicz S J. Seismicity induced by mining[J]. *Advances in Geophysics*, 1990, 32: 1~74.
- [90] Sileny J. Possible mechanism of rockburst in coal mines[J]. *Pageoph*, 1986, 124(4/5): 841~855.
- [91] 李铁, 蔡美峰, 张少泉, 等. 我国的采矿诱发地震[J]. *东北地震研究*, 2005, 21(3): 1~26.
- [92] 李世愚, 和雪松, 张天中, 等. 地震学在减轻矿山地质灾害中的应用进展[J]. *国际地震状态*, 2006, 4: 1~9.
- [93] 李钦祖. 一个研究小地震机制的方法[J]. *地球物理学报*, 1974, 17(3): 155~164.
- [94] 周惠兰. 地震学原理[M]. 北京: 地震出版社, 1982.
- [95] Reasenber P A, Oppenheimer D H. FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions [R]. U. S. Geological Survey Open-File Reptort, 1985.
- [96] Gibowicz S J, Kijko A. 矿山地震学引论[M]. 修济刚, 徐平, 杨心平, 译. 北京: 地震出版社, 1998.
- [97] Riedesel M, Jordan T H. Display and assessment of seismic moment tensors [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1989, 79: 85~100.
- [98] Lee W H K, Stewart S W. Principles and applications of microearthquake networks [M]. New York: Academic Press, 1981.
- [99] Pujol J, Herrmann R. A student's guide to point sources in homogeneous media [J]. *Seismological Research Letters*, 1990, 61: 209~224.
- [100] Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology, Theory and Methods [M]. Vol. I. San Francisco: [s. n.], 1980.
- [101] Butler A G, van Aswegen G. Ground velocity relationships based on large sample of underground measurements in two South African mining regions [C]// *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*, 1993.
- [102] 姜福兴, 王存文, 杨淑华, 等. 冲击地压及煤与瓦斯突出和透水的微震

- 监测技术[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(1): 26~29.
- [103] 成云海, 姜福兴, 程久龙, 等. 关键层运动诱发矿震的微震探测初步研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 273~275.
- [104] 刘建东. 基于声发射与微震技术的新型岩体稳定性监测系统及应用[J]. 有色金属: 矿山部分, 2008, 60(4): 32~35.
- [105] 李庶林, 尹贤刚, 邓文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2058~2053.
- [106] 杨承祥, 罗周全, 唐礼忠. 基于微震监测技术的深井开采地压活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 818~824.
- [107] 唐礼忠. 深井矿地震活动与岩爆监测及预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [108] 邴绍丹, 潘一山. 矿山微震定位方法及应用研究[J]. 煤矿开采, 2007, 12(5): 1~3.
- [109] 王焕义. 岩体微震事件的精确定位研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(3): 5~8.
- [110] 张银平. 岩体声发射与微震监测定位技术及其应用[J]. 工程爆破, 2002, 8(1): 58~61.
- [111] Obert L, Windes S L, Duvall W I. Standardized test for determining the physical properties of mine rock [R]. Report of investigations. [S. l.]: U. S. Bur. Mines, 1946.
- [112] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268~276.
- [113] 胡海波, 王林. 幂律分布研究简史[J]. 物理, 2005, 34(12): 889~896.
- [114] de Beer W, Mendecki A J. Rockburst prediction-case study using a kinematics of failure approach[J]. The Journal of South African institute of mining and metallurgy, 1998(3/4): 65~73.
- [115] 于润沧. 采矿工程师手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [116] Wang Chunlai, Wu Aixiang, Li Rui. Study on fractal characteristics of b value

- with microseismic activity in deep mining[C]//The 6th International Conference On Mining science & Technology, 2009: 592 ~ 597.
- [117] 唐绍辉, 桑玉发. 用分维研究采场顶板失稳的声发射过程[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(3): 22 ~ 25, 42.
- [118] 唐绍辉, 吴壮军. 岩石声发射活动规律的理论与试验研究[J]. 矿业工程与研究, 2000, 2(1): 16 ~ 18.
- [119] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏过程的声发射特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(3): 9 ~ 11.
- [120] Xie Heping. Fractals in rock mechanics[M]. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1993.
- [121] Rundle J B. Derivation of complete Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation using the principle of scale invariance[J]. Journal of Geophy Research, 1989, 94(9): 12337 ~ 12342.
- [122] 王春来, 吴爱祥, 刘晓辉, 等. 深井开采微震活动容量维 D_f 变化特征研究[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(11): 1379 ~ 1382.
- [123] 王春来. 深井开采动力灾害微震监测预警及控制技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2011.
- [124] 秦四清, 李造鼎. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [125] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 混凝土受压全过程声发射 b 值与分形维数的研究[J]. 实验力学, 1996, 11(3): 272 ~ 276.
- [126] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1986.
- [127] Maxwell S C, Young R P. Seismic imaging of rock mass response to excavation [J]. International Journal of Rock Mechanics, 1996, 33: 713 ~ 724.
- [128] 杨志国. 高应力采矿微震监测技术应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2008.
- [129] Potvin Y, Hudyma M R, Jewell R J. Rockburst and seismic activity in underground Australian Mines-An introduction to a new research project[C]// Proceedings of GeoEng 2000, Melbourne, Australia, 2000.

- [130] 赵志峰, 徐卫亚. 基于突变理论的边坡安全稳定性综合评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 2707 ~ 2711.
- [131] Saunders P T. 突变理论入门[D]. 凌复华, 译. 上海: 上海科技文献出版社, 1983.
- [132] 刘军. 突变理论在岩石力学中的应用及发展趋势[J]. 自然杂志, 2000, 5(22): 264 ~ 267.
- [133] 徐强, 黄润秋. 地震作用下结构非线性响应的突变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 19(4): 25 ~ 29.
- [134] 章梦涛, 徐曾和, 潘一山. 冲击地压和突出的统一失稳理论[J]. 煤炭学报, 1991, 16(4): 48 ~ 53.
- [135] 徐曾和, 徐小荷. 柱式开采岩爆发生条件与时间效应的尖点突变[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(2): 17 ~ 23.
- [136] 单晓云, 徐东强, 张艳博. 用突变理论预报巷道岩爆发生的可能性[J]. 矿山测量, 2000, 12: 36 ~ 37.
- [137] 张军. 灰色预测模型的改进及其应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [138] 逢焕东, 姜福兴, 张兴民. 微地震监测技术在矿井灾害防治中的应用[J]. 金属矿山, 2004, 12: 58 ~ 61.
- [139] 李新元, 马念杰. 加拿大矿山具有岩爆倾向的硬岩支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(4): 14 ~ 17.
- [140] 郭然. 有岩爆倾向深埋硬岩矿床采矿理论及其应用研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 2000.
- [141] 杜子建, 徐梦国, 刘振平. 岩爆动力源分析及岩爆防治原则探讨[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(3): 8 ~ 9.
- [142] 吴爱祥, 郭立, 张卫锋. 深井开采岩体破坏机理及工程控制方法综述[J]. 矿业研究与开发, 2001, 21(2): 4 ~ 6.
- [143] 谢和平. 岩爆的分形特征和机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 28 ~ 37.
- [144] 陈明祥, 侯发亮. 岩石损伤模型与岩爆机理解释[J]. 武汉水利电力大学学报, 1993, 26(2): 154 ~ 159.

- [145] Singh S P. The influence of rock properties on the occurrence and control of rock bursts [J]. Mining Science and Technology, 1987(5): 11 ~ 18.
- [146] Al-Homoud A S, Tahtamoni W W. Reliability analysis of three-dimensional dynamic slope stability and earthquake-induced permanent displacement [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000(19): 91 ~ 114.
- [147] Tonon F, Bernardini A, Marnmino A. Reliability analysis of rock mass response by means of Random Sat Theory [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2000(70): 263 ~ 282.
- [148] Krinitzsky E L, Hynes M E, Franklin A G. Earthquake safety evaluation of sanitary landfills [J]. Engineering Geology, 1997(46): 143 ~ 156.
- [149] 钱学森. 工程控制论(新世纪版)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- [150] 中国恩菲工程技术有限公司, 云南驰宏锌锗股份有限公司. 深部资源综合开发利用、环保节能技改工程初步设计[R], 2002.
- [151] 王洪江, 吴爱祥, 肖卫国, 等. 粗粒级膏体充填的技术进展及存在的问题[J]. 金属矿山, 2009, 401(11): 1 ~ 5.
- [152] 吴磊. 深部硬岩巷道支护技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [153] 张海波, 宋卫东. 评述国内外充填采矿技术发展现状[J]. 中国矿业, 2009, 18(12): 59 ~ 63.
- [154] 刘同有. 充填采矿技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 358 ~ 359.
- [155] 王新民, 肖卫国, 张钦礼. 深井矿山充填理论与技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- [156] 张海波, 宋卫东, 许英霞. 充填采矿技术应用发展及存在问题研究[J]. 中国矿业, 2010, 31(1): 23 ~ 25.
- [157] 胡华, 孙恒虎. 矿山充填工艺技术的发展及似膏体充填新技术[J]. 中国矿业, 2001, 10(10): 24 ~ 27.
- [158] 周爱民. 中国充填技术概述[C]//第八届国家充填会议论文集. 北京: [出版者不详], 2004.

- [159] 刘同有, 蔡嗣经. 国内外膏体充填技术的应用与研究现状[J]. 中国矿业, 1998, 7(5): 1241 ~ 1244.
- [160] 孙恒虎. 当代胶结充填技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [161] Jewell R J, Fourie A B. Paste and thickened tailings-A guide[M]. 2nd ed. [S. l.]: Australian Centre for Geomechanics, The University of Western Australia, 2006.
- [162] 马鞍山矿山研究院, 云南驰宏锌锗股份有限公司. 会泽矿区选厂尾矿库开采可行性研究[R], 2007.